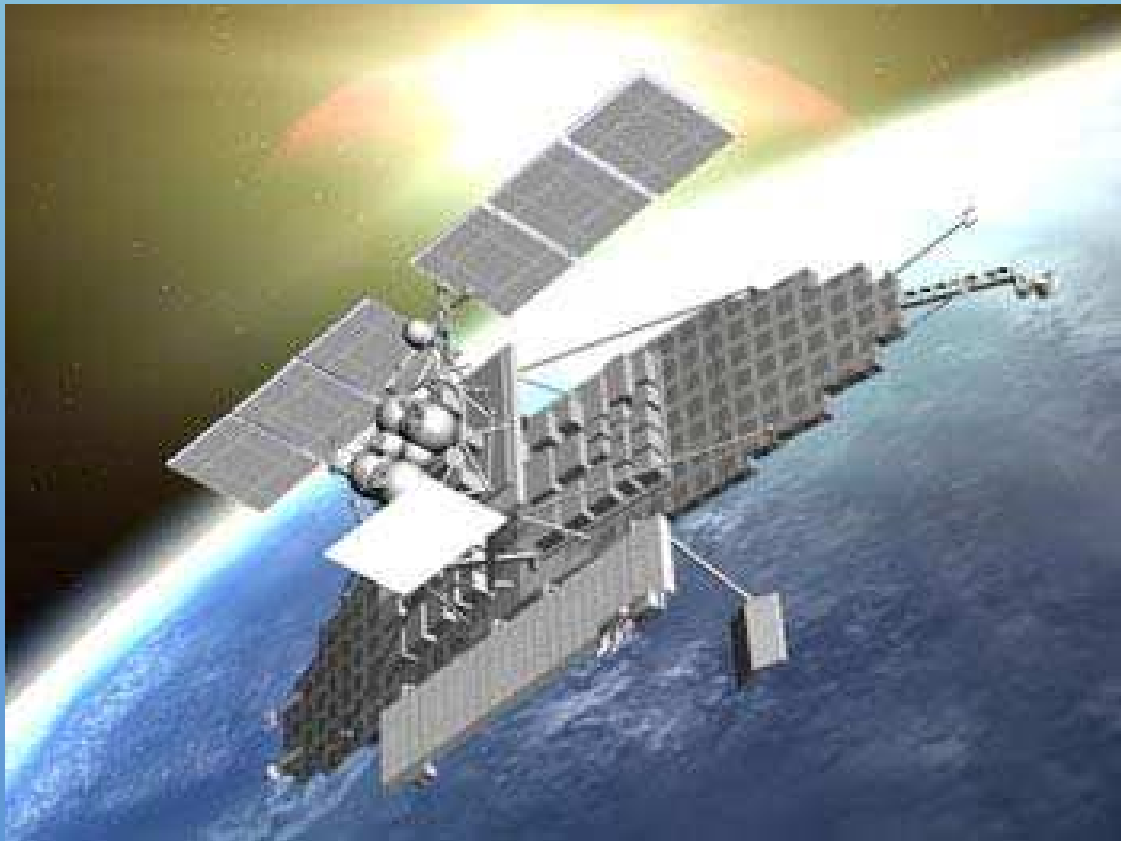


MERINO VALDIVIA Daniel
Elève de 3^{ème} année de l'ENSAM

2008-2009

PFE 09036
Soutenance du 22/06/2009

ÉTUDES CLIMATOLOGIQUES À PARTIR DE DONNÉES ISSUES D'UNE PLATEFORME SPATIALE



Tuteurs :



M. KUSZLA Patrick



M. LEMAITRE Yvon
M. VILTARD Nicolas

Fiche – résumé – accessibilité

ANNEE : 2008-2009

GROUPE : ENG

NUMERO DU PFE : 09036

CENTRE DE RATTACHEMENT PFE : PARIS

AUTEUR : MERINO VALDIVIA Daniel

TITRE : Etudes climatologiques à partir de données issues d'une plateforme spatiale

ENCADREMENT DU PFE : Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS)

NOMBRE DE PAGES : 47

NOMBRE DE REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

RESUME : L'étude vise à la construction d'un simulateur de radar Doppler installé sur une plateforme spatiale. On modélisera pour cela l'orbitographie du satellite ainsi que l'échantillonnage réalisé par l'antenne radar. Comme application, on simulera la reconstitution d'un champ de vent 3D.

MOTS CLES : Satellite, Radar Doppler, Champ de vent, Echantillonnage, Signal, Densité de points de mesure, Erreurs de reconstitution, Foot-Print, Hauteur sombre.

PARTIE A REMPLIR PAR LE PROFESSEUR RESPONSABLE DU PROJET

ACCESSIBILITE DE CE RAPPORT (entourer la mention choisie) :

Classe 0 = accès libre

Classe 1 = Confidentiel jusqu'au _ _ _ _ _

Classe 2 = Hautement confidentiel jusqu'au _ _ _ _ _

Date : **Nom du signataire :** **Signature :**

Table des matières

0. INTRODUCTION.....	7
0.1 Présentation du LATMOS.....	7
0.2 Contexte scientifique.....	8
0.3 Présentation du projet.....	9
0.4 Méthodologie de travail.....	9
1. PRESENTATION DE LA PLATFOME SPATIALE.....	10
2. ETUDE PLUS RÉALISTE.....	10
2.1 Présentation.....	10
2.2 Paramétrage.....	11
2.3 Validation de l'algorithme.....	12
3. RAPPELS THEORIQUES.....	14
3.1 Coordonnées sphériques.....	14
3.2 Distance sphérique.....	14
3.3 Fonctionnement d'un radar.....	15
3.4 Effet Doppler.....	16
3.4.1 Définition.....	16
3.4.2 Application de l'Effet Doppler.....	17
4. DEVELOPPEMENT DU SIMULATEUR.....	18
4.1 Modélisation géométrique.....	19
4.1.1 Définition des Paramètres employés.....	19
4.1.2 Localisation du satellite.....	20
4.1.3 Dimensionalisation du foot-print.....	21
4.1.4 Position du foot-print.....	28
4.2 Modélisation des signaux du radar.....	30
4.2.1 Définition des Paramètres utilisés.....	30
4.2.2 Traitement du signal.....	30
4.2.3 Intégration.....	32
4.2.4 Hauteur sombre.....	32
4.3 Résultats des simulations.....	33
5. RECONSTITUTION D'UN CHAMP DE VENT.....	37
5.1 Maillage.....	37
5.2 Protocole suivi.....	38
5.3 Résultats.....	41
5.3.1 Densité de points de mesure.....	41
5.3.2 Erreur dans la reconstitution de « u » et « v ».....	42
5.3.3 Erreur dans la reconstitution de « w ».....	45
6 CONCLUSIONS	46
6.1 Etat d'avancement	46
6.2 Bilan.....	47
6.3 Travail à accomplir.....	47

Bibliographie

Annexe A1 : Notice du programme Doppler

0. INTRODUCTION

0.1 Présentation du LATMOS

Le LATMOS est une nouvelle unité de recherche créée le 1^{er} janvier 2009 et issue de l'ancienne unité de Recherche appelée CETP.

L'activité de recherche du CETP était répartie selon trois grands domaines thématiques :

- ❖ Processus Physiques dans l'atmosphère météorologique et aux interfaces entre l'atmosphère et la surface terrestre.
- ❖ Modélisation électromagnétique et statique appliquées à l'étude de l'environnement de la Terre et des Planètes.
- ❖ Planétologie et plasmas de l'environnement terrestre et planétaire.

Les deux premiers domaines de recherche présentant de grandes complémentarités avec ceux de l'unité de recherche appelée Service d'Aéronomie, une partie du CETP s'est adjoint à ce dernier pour former un Laboratoire unique : le LATMOS – Laboratoire Atmosphère, Milieux et Observations Spatiales. Cette dynamique de fusion s'accompagne de la mise en place du site de Guyancourt, qui devrait rassembler au premier semestre 2009 sur un même lieu outre le LATMOS, des moyens techniques importants au service de l'activité instrumentale, sol, embarquée en avions ou ballons, et surtout spatiale. Le LATMOS focalise son étude sur les thèmes :

- Processus physiques et chimiques dans l'atmosphère Terrestre (depuis la basse atmosphère, jusqu'à la stratosphère et la mésosphère) et les échanges entre l'atmosphère et la surface terrestre (océan/continents) ;
- Étude des planètes et petits corps du système solaire (atmosphères, surfaces, sub-surfaces) ;
- Physique de l'héliosphère, de l'exosphère et des plasmas du système solaire.

Le LATMOS est un laboratoire à forte composante expérimentale avec :

- ❖ Une activité importante de développement d'instruments innovants mis en œuvre depuis des stations au sol, depuis des avions ou ballons ou depuis des satellites. Les principales techniques qui font la spécialité du LATMOS sont relatives aux :

- Instruments optiques (spectromètres optiques, lidars) pour l'étude de la composition des atmosphères (gaz, aérosols) terrestres et planétaires, la caractérisation de la structure thermique et de la dynamique de la haute atmosphère terrestre, l'étude des propriétés du soleil (diamètre, irradiance),
- Instruments hyperfréquence (radars, radiomètres), pour l'étude des systèmes météorologiques précipitants, des nuages, de la dynamique atmosphérique et des caractéristiques de surface (océan, continent) et de subsurface (stratifications et composition des couches profondes de la planète Mars).
- A la chromatographie en phase gazeuse, pour l'étude de la composition chimique de l'atmosphère et du sol des planètes telluriques à la spectrométrie de masse à temps de vol pour la mesure de la composition moléculaire des atmosphères neutres planétaires.
- A la spectrométrie de masse à ionisation chimique pour l'étude des polluants atmosphériques
- A la mesure de champs électriques dans l'atmosphère terrestre ou des planètes.
 - Une activité et expertise reconnue dans le domaine de l'analyse d'observations de la Terre, des planètes et de l'héliosphère depuis l'espace (implication dans des missions spatiales telles au ENVISAT/GOMOS, ENVISAT/SAR, METOP/IASI, TRMM, CLOUDSAT/CALIPSO, MEGHA-TROPIQUES, SMOS, CFOSAT, SPICAV, PICARD, SOHO,...) ;
 - Une activité fondée sur les réseaux ou systèmes d'information au sol (réseaux internationaux de mesures, notamment réseau NDACC de surveillance de la composition atmosphérique de la haute atmosphère, projet européen GEOMON) ;
 - Une participation active aux campagnes internationales de terrain (AMMA, SCOUT-03, POLARCAAT,...) par la mise en œuvre d'instrumentation au sol et aéroportée ;
 - Des études en chambre de simulation des atmosphères planétaires (PAMPRE).

Le département SPACE, cadre de mon projet, s'intéresse aux phénomènes météorologiques à mésoéchelle des latitudes moyennes et tropicales et à leur effet sur les circulations de plus grande échelle. Ses travaux de recherche ont pour objectifs l'étude des processus physiques et leur prise en compte dans les modèles météorologiques ou climatiques. Ils portent sur deux grands types de phénomènes : ceux qui posent des problèmes de prévision, qualifiés d'extrêmes du fait de leur conséquences économiques et humaines, et ceux qui jouent un rôle essentiel dans contrôle du climat.

0.2 Contexte Scientifique du projet

Depuis plus d'une décennie, de nombreux pôles de recherche tels que le LATMOS, ont investi fortement sur l'étude et la caractérisation des systèmes nuageux et précipitants en développant des systèmes de plus en plus sophistiqués d'observation spatiale.

Le lancement en novembre 1998 de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, NASA-JAXA) a été une étape fondamentale dans l'estimation des précipitations depuis l'espace. TRMM a innové sur deux aspects, d'une part la résolution spatiale du radiomètre imageur (TRMM Microwave Imager, TMI) a permis de s'affranchir en partie des problèmes

d'hétérogénéité de la pluie et d'autre part la mission a emporté le premier radar spatial pour l'estimation de la pluie (Precipitation Radar, PR).

Le concept de TRMM ayant démontré son intérêt, un système similaire a été lancé pour l'étude des nuages avec Cloudsat et CALIPSO comme composante de l'AQUA-Train (NASA, JAXA, CNES). Le principe est ici de faire voler une série d'instruments actifs et passifs complémentaires (radar, lidar, radiomètre, ...) sur une série de plates-formes se suivant à quelques minutes d'intervalle. Les premiers résultats sont déjà très prometteurs et il est probable que les données de l'AQUA-Train vont permettre des avancées aussi spectaculaires que celles obtenues pendant la décennie de TRMM.

C'est dans ce cadre scientifique que s'insère la mission KARMA proposée à l'agence française de l'espace CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) par les membres du CETP/LATMOS Nicolas Viltard, Alain Protat et Yvon Lemaître, et de différents organismes tels que LMD, CEPMMT et THALES. L'objectif principal de cette mission est d'étudier le cycle de l'eau et de l'énergie associée aux systèmes nuageux et précipitants et leur impact.

Trois options instrumentales ont été proposées :

- ❖ Un radiomètre et un radar en orbite tropicale
- ❖ Un Radiomètre et un radar Doppler en orbite tropicale
- ❖ Un radiomètre et radar Doppler en orbite polaire

0.3 Présentation du projet

Le choix entre les différentes configurations proposées se fera en fonction de critères tels que le risque, l'intérêt scientifique et la valeur ajoutée du projet. Pour évaluer les différentes options envisagées il est nécessaire, entre autres, de réaliser une modélisation du fonctionnement du système instrumental et des simulations tenant compte le plus grand nombre possible de contraintes imposées par l'instrument lui-même et par le milieu dans lequel il va fonctionner.

Le projet fin d'études proposé à l'ENSAM dans ce contexte, porte sur la mise en place d'un simulateur de la plate-forme spatiale équipée d'un radar Doppler.

0.4 Méthodologie de travail

Dans un premier temps, durant le premier semestre, j'ai travaillé un jour par semaine dans le laboratoire LEMFI de l'ENSAM. Lors de cette première étape, j'ai réalisé une pré-étude du simulateur exploitant une hypothèse simplificatrice de Terre plate. Cette pré-étude a consisté à modéliser le mouvement, supposé rectiligne, du satellite ainsi que le balayage conique de l'antenne installée sur ce dernier. Les simulations réalisées avaient pour objectif de déterminer, sous cette hypothèse de terre plate, les caractéristiques de l'empreinte au sol (appelé foot-print dans la suite) et son aspect (obtenu à l'aide d'un logiciel de tracé développé au cours de cette première étape).

Suite à cette première étape, j'ai commencé mon stage au LATMOS où j'ai poursuivi ce travail pour atteindre progressivement les objectifs fixés. Le simulateur a été progressivement doté de fonctionnalités lui permettant de s'approcher de la réalité en éliminant les hypothèses simplificatrices utilisées initialement. Le simulateur ainsi obtenu a reçu alors comme première application, l'évaluation de la capacité du radar Doppler à reconstruire un champ de vent et la sensibilité de la reconstruction à certains des paramètres d'entrée du simulateur.

1. PRESENTATION DE LA PLATFORME SPATIALE

La plateforme spatiale considérée dans ce travail, comme indiquée précédemment, est constitué d'un radar Doppler qui balaye vers le bas selon un cône d'axe vertical. Une représentation simplifiée en est donnée dans la figure 1. Au cours de ce balayage le radar émet un signal électromagnétique qui se réfléchit sur des cibles que sont les hydrométéores (particules de pluie, de nuage ou de glace) et reçoit en retour un signal qui est analysé afin d'obtenir l'intensité des précipitations (proportionnel à l'intensité du signal rétrodiffusé) et la vitesse des cibles (effet Doppler). La qualité de la documentation par ce radar des champs de précipitations (description spatiale 3D) et des champs de vent (que l'on peut reconstituer à partir de plusieurs de ces mesures Doppler selon des directions non-colinéaires obtenues au cours du déplacement du satellite) dépendra en particulier de la densité de l'échantillonnage réalisé par le radar au cours de son déplacement. C'est pourquoi dans un premier temps, ce travail s'est intéressé au calcul et à la visualisation de l'échantillonnage réalisé. Comme indiqué également précédemment, dans une première étape ont été utilisées certaines hypothèses simplificatrices explicitées dans la suite.

2. ETUDE PRELIMINAIRE SIMPLIFIEE

2.1. Présentation

L'objectif est donc ici représenter graphiquement l'ensemble des points d'incidence du signal émis par le radar au fur et à mesure que la plate-forme se déplace. Comme je l'ai mentionné précédemment, pour cette première étude j'ai considéré comme surface d'interception une Terre plate. On s'intéresse alors au mouvement des éléments qui composent le système d'étude. On suppose que la plate-forme décrit un mouvement de translation à vitesse constante en même temps que l'antenne tourne autour d'un axe fixe vertical perpendiculaire à la trajectoire rectiligne du satellite. On considère dans un premier temps que le faisceau émis par l'antenne est étroit (en réalité ce faisceau possède une certaine largeur angulaire de quelques degrés qui fait que l'empreinte est d'autant plus grande que le radar est loin du sol) et donc que l'empreinte au sol de ce faisceau sera ponctuelle. Dans la suite nous donnons le détail des calculs réalisés pour simuler cet échantillonnage.

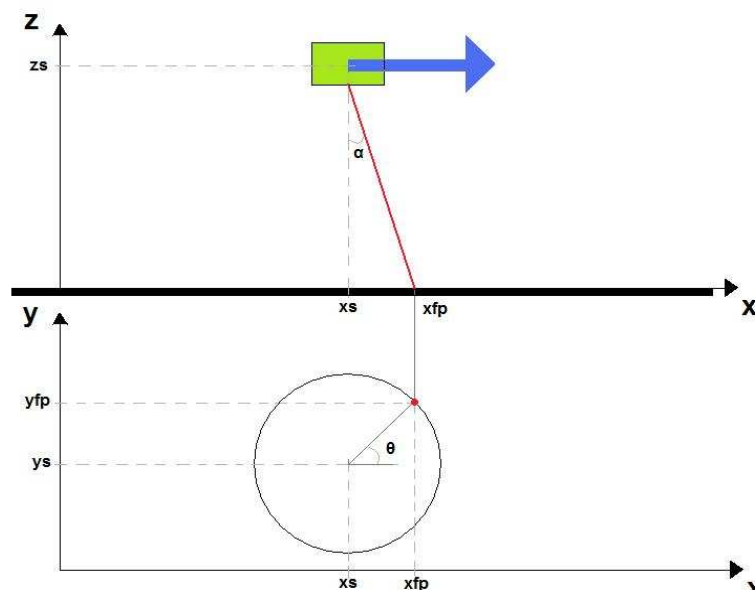


Figure 1 - Schéma représentatif de l'étude simplifiée

2.2. Paramétrage

Afin de pouvoir modéliser l'échantillonnage simplifié réalisé par le système, j'ai utilisé les paramètres présentés à ci-dessous :

✚ Paramètres concernant le satellite :

- Altitude : z_s
- Coordonnée Est-Ouest : x_s
- Coordonnée Nord-Sud : y_s
- Vitesse du satellite : V_x

✚ Paramètres concernant la position de l'antenne :

- Ouverture de l'antenne : α
- Angle de balayage : θ
- Vitesse de rotation de l'antenne : $\dot{\theta}$
- Nombre de points par tour d'antenne : n

✚ Paramètres concernant le temps :

- Variable : t
- Temps maximal : t_{\max}
- Intervalle de temps entre deux empreintes : dt

✚ Paramètres concernant la position du foot-print :

- Altitude : z_{fp}
- Coordonnée Est-Ouest : x_{fp}
- Coordonnée Nord-Sud : y_{fp}

L'exploitation géométrique du schéma présenté sur la figure 1 me permet d'obtenir les coordonnées de l'empreinte du rayon issu du radar embarqué en fonction de l'angle d'ouverture de l'antenne et de l'angle de balayage :

$$x_{fp} = x_s + z_s * \tan(\alpha) * \cos(\theta)$$

$$y_{fp} = y_s + z_s * \tan(\alpha) * \sin(\theta)$$

Je considère que la plate-forme se déplace d'Ouest en Est (au long de l'axe x) sans variation d'altitude.

Le code Fortran construit à partir de ces équations de base permet de simuler le balayage et le déplacement réalisé par le radar pour une durée déterminée (t_{\max}). Le logiciel de tracé permet à partir des coordonnées du foot-print (x_{fp}, y_{fp}, z_{fp}) obtenue en sortie à chaque instant de visualiser l'échantillonnage obtenu. Afin de pouvoir valider cet algorithme, on initialise les différents paramètres avec des valeurs arbitraires :

x_s	y_s	z_s	θ	$\dot{\theta}$	α	n
0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	45.0°	100.0

2.3. Validation de l'algorithme

Pour valider cet algorithme la position de l'empreinte à chaque instant est tracée pour différentes valeurs des paramètres d'entrée et l'allure de la « courbe » obtenue est analysée.

On commence par visualiser la courbe d'échantillonnage obtenue en imposant une vitesse nulle du satellite : $V_x = 0$. L'antenne installée dans la plate-forme tourne sans que celle-ci se déplace donc l'ensemble des points doit décrire un cercle. On fait tourner la simulation pour 3 altitudes différentes d'où les résultats présentés dans la figure 2.

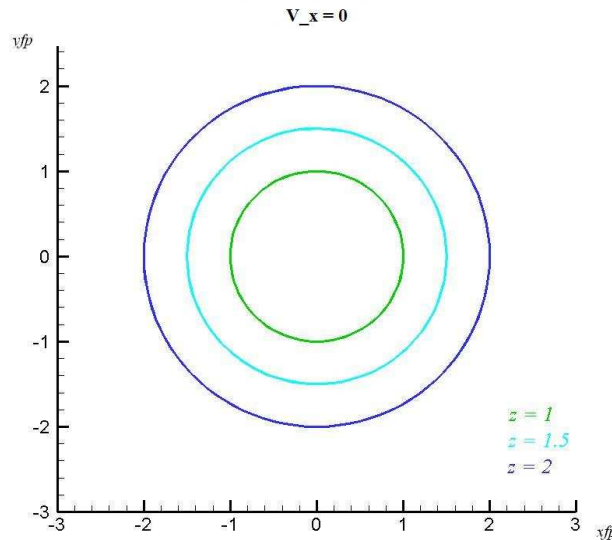


Figure 2 - Simulation avec $V_x = 0$ pour différentes altitudes du satellite

Comme il était prévu, le rayon du cercle augmente avec l'altitude à laquelle se trouve le satellite.

Ensuite, on fixe l'altitude de la plate-forme z_s ainsi que sa vitesse de translation V_x et on fait varier la vitesse de rotation de l'antenne $\dot{\theta}$ obtenant les courbes présentées dans la figure 3.

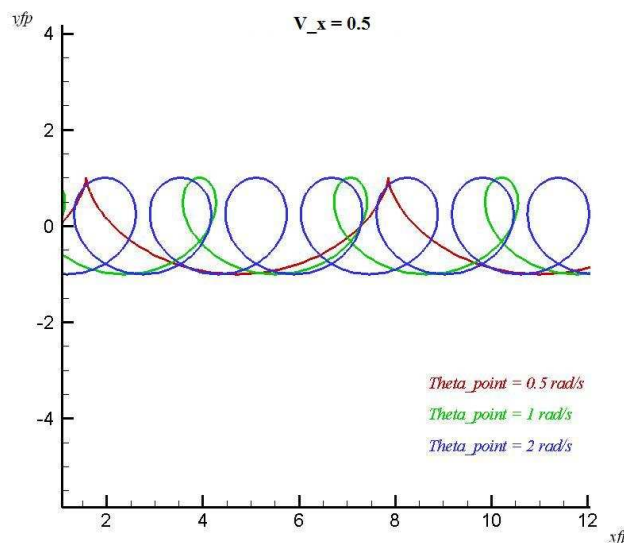


Figure 3 - Simulation avec $V_x = 0$ pour différentes vitesses de rotation de l'antenne

On observe bien que plus on réduit la vitesse de rotation de l'antenne, plus la spirale décrite est étendue jusqu'à devenir une cycloïde.

Finalement, tout en fixant l'altitude et la vitesse de rotation, on fait varier la vitesse de translation du satellite (cf. figure 4).

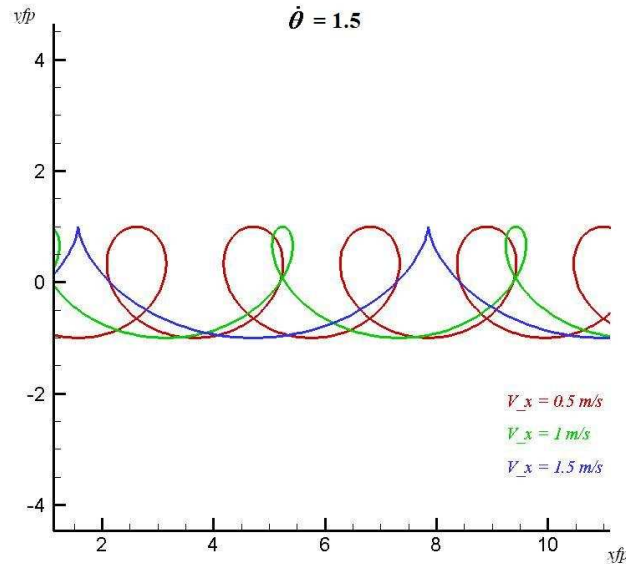


Figure 4 - Simulation avec $\dot{\theta} = 1.5$ pour différentes vitesses du satellite

On retrouve le même effet d'élargissement des spirales lorsqu'on augmente la vitesse de translation de la plate-forme.

Cette première prise de contact avec la problématique m'a permis de valider un premier algorithme simple produisant les coordonnées du foot-print tout au long d'un intervalle de temps. De même j'ai pu vérifier l'influence des différents paramètres sur l'allure de la courbe d'échantillonnage. Ultérieurement on montrera que lorsqu'on s'approche du modèle réel d'autres paramètres vont entrer en jeu et ceux que l'on a fait varier dans cette étude préliminaire (vitesse de translation, vitesse de rotation et altitude de la plateforme) seront en fait fixés pour des raisons de contraintes d'orbitographie ou techniques.

3. ETUDE PLUS REALISTE

Le modèle pour une Terre plate étant validé, je me suis ensuite focalisé sur la prise en compte dans le simulateur d'une géométrie qui permet d'aborder le problème de façon plus réaliste. Dans la suite sont introduites toutes les notions qui ont servies à l'amélioration du simulateur.

3.1. Validation de l'algorithme

J'ai tout d'abord introduit dans le simulateur les coordonnées sphériques : latitude, longitude et altitude.

- ❖ La latitude φ d'un point sur la Terre correspond à la distance angulaire, généralement exprimée en degré, qui sépare ce point de l'équateur. Les latitudes se comptent de -90° à $+90^\circ$ et la latitude de l'équateur est 0° .
- ❖ La longitude λ d'un point sur la Terre correspond à la distance angulaire, généralement exprimée en degré, qui sépare ce point du méridien de Greenwich. Les longitudes, comme c'était le cas des latitudes, se comptent de -90° à $+90^\circ$, la longitude du méridien de référence étant 0° .

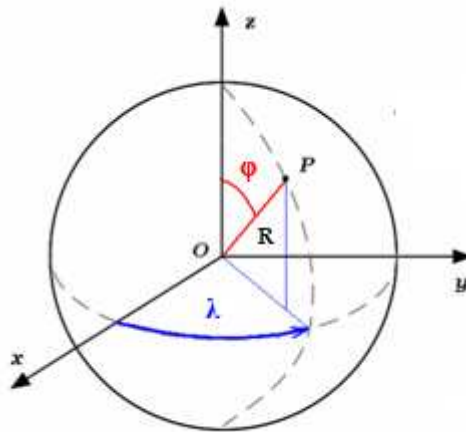


Figure 5 - Coordonnées sphériques

- ❖ L'altitude z va se définir, selon les cas, soit comme la distance par rapport au centre de la Terre soit comme celle par rapport à sa surface ($R_{\text{terre}} \sim 6400\text{km}$).

3.2. Distance sphérique

Pour pouvoir calculer la distance entre deux points sur la surface terrestre, distance sphérique, on utilisera la formule de Haversine. On peut quantifier cette distance (d) connaissant les longitudes et latitudes des deux points à l'aide de cette formule qui s'écrit:

$$\sin^2\left(\frac{d}{2R}\right) = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

avec $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$ et $\Delta\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|$.

On utilisera cette formule pour obtenir la distance entre les points qui définissent les axes principaux du foot-print qui se présente sous forme d'un ellipsoïde.

3.3. Fonctionnement d'un radar

Le radar fut développé et utilisé pour la première fois juste avant la deuxième Guerre Mondiale. La découverte incessante d'applications fait que son développement se poursuit actuellement afin de satisfaire des besoins aussi bien militaires que civils. L'acronyme « Radar » est un mot anglais qui signifie « radio detection and ranging ».

Le radar est instrument capable de transmettre un signal électromagnétique, recevoir un écho de celui-ci et déterminer à partir des caractéristiques du signal reçu des informations sur les objets naturels (gouttes d'eau, glace, insectes, aérosols, etc.) qui servent de cibles. Les ondes électromagnétiques, selon la longueur d'onde du signal électromagnétique utilisée, peuvent être également réfléchies par toute variation significative des constantes diélectriques ou diamagnétiques du milieu traversé.

Dans le cas présent les cibles considérées sont les particules d'eau ou de glace (nuages, précipitations) en suspension dans l'atmosphère qui caractérisent les phénomènes météorologiques.

Les ondes, produites par un oscillateur radio et transmises par une antenne et réfléchies varient en amplitude et en fréquence lors de leur réflexion selon le contenu en eau/glace et la vitesse de déplacement des cibles.

Dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons plus particulièrement à ces radars appelés « Doppler » du nom de son inventeur dont la particularité est de pouvoir mesurer la vitesse de déplacement des cibles dans la direction de visée du radar (appelé vitesse Doppler), et de permettre de reconstituer les composantes de ce vecteur déplacement.

Les radars sont classifiés selon le type d'émission du signal électromagnétique utilisé :

- ❖ **Radars pulsés** : le radar émet un pulse et attend son retour.
- ❖ **Radars à émission continue** : on émet continuellement à travers d'une antenne et on reçoit par une autre.

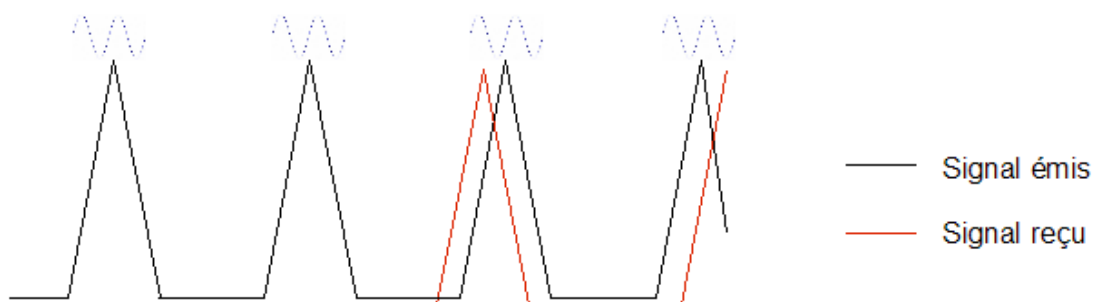


Figure 6 - Emission et réception du signal radar

Pour plupart des radars exploités actuellement pour la documentation météorologique, la base de la détection est l'émission de pulses électromagnétiques avec une fréquence de répétition appelée PRF (Pole Répétition Frequency). A chaque pulse, l'antenne émet une onde dont on connaît la fréquence d'émission.

Dans le cas du projet, sera considéré un radar hybride entre les deux présentés précédemment, c'est-à-dire que l'instrument de détection n'est composé que d'une seule antenne qui émet en continu et reçoit en même temps. Il est donc nécessaire d'établir une fauchée temporelle pour encadrer la réception possible d'un signal afin d'éviter des superpositions avec le signal émis et donc les erreurs dans les mesures. Pour cela, il est nécessaire de bien définir le domaine spatial d'observation (distance aux systèmes cibles depuis l'antenne) ce qui nous permet d'obtenir directement le temps mis par le signal pour faire un aller-retour. Cette étude analytique sera développée suite à la mise en place des paramètres qui permettent de définir notre système d'étude. On imposera alors les contraintes auxquelles on devra faire face pour respecter l'approche réelle du simulateur.

3.4. Effet Doppler

3.4.1. Définition

Ce phénomène physique doit son nom au physicien autrichien Christian Doppler, qui en 1842 présenta une théorie sur la variation de fréquence d'une onde entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie en fonction du temps. Cet effet s'applique dans de nombreux domaines de la science comme par exemple la médecine où l'on peut le retrouver à la base des échographies.

Considérons une cible ponctuelle située à une distance r du radar. Pour que cette cible soit détectée il faut que l'onde émise par l'antenne parcoure deux fois cette distance – aller et retour – soit $2 \cdot r$. Cette distance peut se mesurer de même en terme de longueurs d'onde entre le radar et la cible, ce qui correspond à $\frac{2r}{\lambda}$ où λ est la longueur d'onde du signal émis. On peut exprimer cette distance en radian en sachant que une longueur d'onde = 2π radians, obtenant ainsi $\frac{2r \cdot 2\pi}{\lambda}$.

Si un signal radar est émis avec une phase initiale Φ_0 , la phase du signal écho sera déplacée vers la valeur :

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{4\pi r}{\lambda}$$

La variation de phase avec le temps entre un pulse et le suivant est donc donnée par :

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{dr}{dt}$$

Or la vitesse d'un objet peut s'exprimer comme la variation de la distance entre ce dernier et un point de référence, soit :

$$V_d = \frac{dr}{dt}$$

Notons que V_d est la vitesse avec laquelle la cible se rapproche ou s'éloigne du radar (selon la direction de visée du radar).

La fréquence angulaire est le taux de variation temporel d'un angle (ou phase) que l'on peut définir comme :

$$\Omega = \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f$$

Où f est le saut de fréquence en cycles par seconde (Hz). On peut donc conclure que :

$$\Delta f = \frac{2V_d}{\lambda}$$

On retrouve donc ci-dessus l'expression du saut de fréquence dû à une cible en mouvement relatif par rapport au radar, à la base de l'effet Doppler.

3.4.2. Application de l'effet Doppler

Comme on l'a précisé dans le paragraphe précédent, l'effet Doppler a de nombreuses applications. En ce qui concerne la météorologie, la principale application est la reconstruction de champs de vitesses à travers la détection d'hydrométéores (pluie, nuages, glace) en mouvement.

Dans la suite, afin d'évaluer la sensibilité de champs de vents restitués aux paramètres d'entrée du simulateur, nous serons amenés à synthétiser des mesures Doppler à partir de champs de vents conceptuels. Pour ce faire il est nécessaire de réaliser les étapes suivantes.

La première étape de ce processus consiste à calculer la Vitesse Doppler (V_d) en chaque point du domaine d'échantillonnage, c'est-à-dire obtenir la projection du vecteur vent sur le faisceau radar.

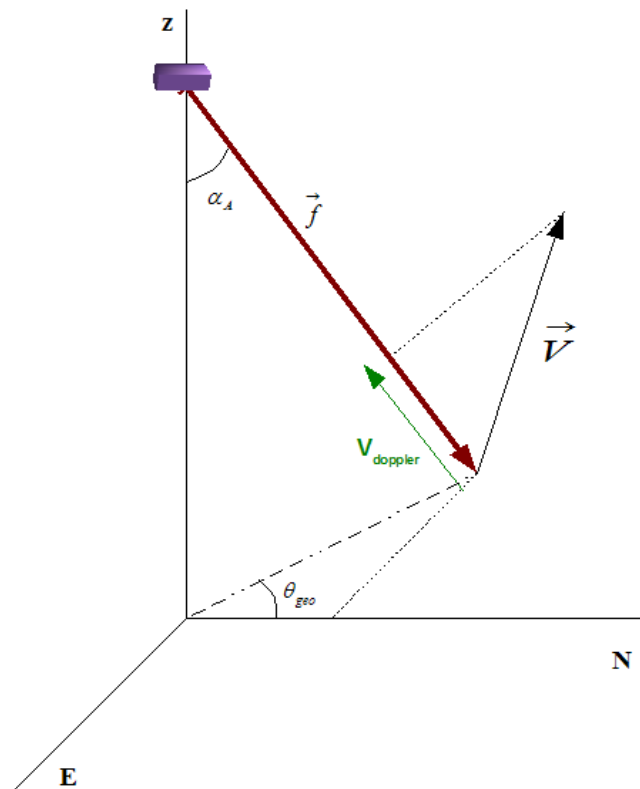


Figure 7 - Calcul de la Vitesse Doppler

\vec{V} représente le vecteur vitesse :

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$$

Le faisceau radar est représenté par le vecteur unitaire \vec{f} dont les composantes peuvent s'exprimer en fonction des paramètres géométriques définis précédemment (OU ???):

$$\vec{f} = \begin{pmatrix} \sin(\alpha_A) \cdot \cos(\theta_{geo}) \\ \sin(\alpha_A) \cdot \sin(\theta_{geo}) \\ -\cos(\alpha_A) \end{pmatrix}$$

En réalisant le produit scalaire, on peut alors obtenir l'expression de la Vitesse Doppler :

$$V_d = \frac{\sin(\alpha_A) \cdot \cos(\theta_{geo}) \cdot u + \sin(\alpha_A) \cdot \sin(\theta_{geo}) \cdot v - \cos(\alpha_A) \cdot w}{\sqrt{\sin^2(\alpha_A) \cdot \cos^2(\theta_{geo}) + \sin^2(\alpha_A) \cdot \sin^2(\theta_{geo}) + \cos^2(\alpha_A)}}$$

Cette expression de la vitesse Doppler montre clairement le principal problème que toute méthode de reconstitution de champs de vent doit surmonter : V_d représente uniquement la projection du vecteur vitesse de l'objet sur la droite support du faisceau radar. Le champ de vent (et donc les trois composantes du vent) ne peut donc être reconstitué que si l'on dispose de plusieurs mesures radar (vitesse Doppler) non colinéaires dans un même domaine spatial.

Dans la section 4, on verra comment, à partir de la méthode des moindres carrés, il est possible d'obtenir des résultats satisfaisants lors de la reconstitution d'un champ de vent. La validité de ces résultats sera évidemment fonction de la résolution du maillage utilisé, de la localisation de l'objet cible par rapport à la position du satellite et pour finir du bruit.

4. DEVELOPPEMENT DU SIMULATEUR

Nous en arrivons maintenant à la description du simulateur développé dans ce travail et des équations sur lequel il repose. Ce simulateur comporte plusieurs modules qui concernent l'orbitographie du satellite, le balayage et les propriétés géométriques du faisceau radar, le signal radar émis.

Le but étant de simuler l'échantillonnage réalisé par le radar, on cherche tout d'abord à obtenir la position et taille de l'empreinte au fur et à mesure que le satellite se déplace et que l'antenne tourne. L'exploitation des mesures Doppler simulées à l'aide de ce simulateur nous permettra ensuite d'évaluer la reconstitution de champs de vents à partir des mesures d'un tel radar spatial.

4.1. Modélisation géométrique

4.1.1. Définition des paramètres employés

Les paramètres qui nous ont servi à modéliser géométriquement le système étudié sont classés en fonction du domaine auxquels ils appartiennent :

Paramètres concernant la géométrie de la Terre

- R_t : Rayon de la Terre fixé à 6400km.
- R : Rayon de mesures. Ce paramètre sera utilisé pour localiser la position de l'empreinte (foot-print). R varie donc entre 6400 Km (R_t) et 6420 Km puisque les phénomènes météorologiques qui nous intéressent sont localisés dans les 20 premiers kilomètres de l'atmosphère.

Paramètres concernant le satellite

- z_s : Altitude du satellite par rapport à la surface de la Terre. Ce paramètre est considéré dans la simulation comme une constante fixée initialement. On ne tiendra donc pas en compte les variations d'altitude subordonnées à l'orbite suivie par le satellite. Celles-ci peuvent cependant être prise en compte si nécessaire dans le simulateur.
- ϕ_s, λ_s : Latitude et longitude du satellite à chaque instant.
- $V_{sat_u}, V_{sat_v}, V_{sat_w}$: Composantes du vecteur vitesse du satellite suivant les directions respectives WE, NS et verticale.

Paramètres concernant l'antenne

- $\dot{\theta}$: Vitesse de rotation de l'antenne. Elle est fixée dans ce travail à 90 tour/s.
- α : Angle d'ouverture de l'antenne. Il est fixé initialement à 45°.
- β : Angle d'ouverture du faisceau mesuré en degrés. Ce paramètre est considéré comme constant tout au long de la simulation. Il est fixé initialement à 1° qui correspond à une valeur typique des radars.
- θ_{geo} : Angle de balayage de l'antenne par rapport au Nord. Il varie entre 0 et 360°.

Paramètres concernant le foot-print

- ϕ, λ : Latitude et longitude de l'empreinte
- $\Delta\phi, \Delta\lambda$: Différence entre la latitude/longitude de foot-print et latitude/longitude du satellite.
- a, b : Axes principaux de l'empreinte modélisée comme une ellipse.

Paramètres temporels

- t : Paramètre permettant de repérer dans une échelle temporelle la position du satellite et de l'antenne.
- t_{max} : Durée totale de la simulation.
- t_i : Temps d'intégration. Il s'agit de l'unité temporelle fixée initialement pendant laquelle on réalise l'intégration des mesures fournies par le radar au fur et à mesure que

l'antenne tourne. On considère ce paramètre comme le pas de temps dans la simulation intégrée.

Autres paramètres

- γ : Angle d'incidence du faisceau sur la surface sphérique de rayon R considérée. C'est l'angle formé par les droites (SX) et (OX).
- Y : Longueur du faisceau émis par le radar. Il s'agit de la distance entre le satellite et le foot-print, c'est-à-dire la longueur du segment [SX], appelé aussi « slant path ».
- F : Fauchée du radar. Il s'agit de la distance entre le foot-print (point X) et la droite (SO).

4.1.2. Localisation du satellite

Dû à la complexité de la géométrie étudiée, on présente premièrement un schéma d'interdépendance (cf. figure 8) entre les différents paramètres qui interviennent dans les calculs de la position du satellite au fur et à mesure que celui-ci se déplace selon son orbite. On montre en effet que le choix de certains paramètres impacte directement les autres paramètres et de ce fait limite considérablement les degrés de liberté sur ces choix.

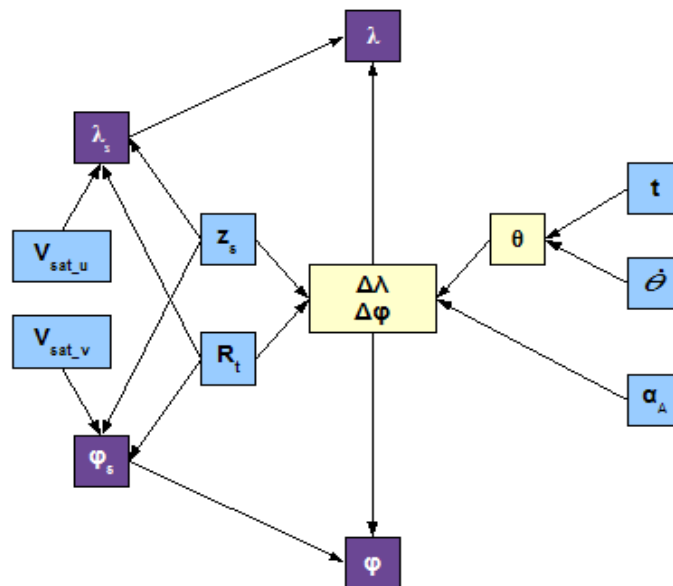


Figure 8 - Schéma d'interdépendance aboutissant l'obtention de la position du satellite et des empreintes

Le schéma présenté ci-dessus met en relation les paramètres qui interviennent sur le calcul de φ_s, λ_s (latitude et longitude du satellite à chaque instant) mais aussi sur les pas suivis pour aboutir à la position du foot-print étudié dans le paragraphe suivant.

On rappelle que l'on considère la Terre comme une sphère parfaite. Pour simplifier la modélisation du mouvement du satellite autour de cette sphère, on suppose que celui-ci décrit une orbite circulaire parfaite suivant la latitude de l'équateur.

On peut donc, tout d'abord définir la position du satellite en fonction de sa vitesse, du temps et de son altitude :

$$\begin{cases} \varphi_s = \frac{V_{sat_v}}{R_t + z_s} \cdot t \\ \lambda_s = 0 \end{cases}$$

Évidemment, si le satellite décrit une orbite suivant la ligne imaginaire de l'équateur, la longitude λ_s prendra toujours la valeur 0.

Les coordonnées du satellite (φ_s, λ_s) nous serviront pour calculer la position du foot-print à chaque instant (φ, λ) comme on peut observer dans le schéma d'interdépendance.

4.1.3. Dimensionalisation du foot-print

Le foot-print est considéré dans cette modélisation géométrique comme l'intersection entre le cône représentant le faisceau émis par le radar et la sphère de rayon R. Cette empreinte a l'allure d'une ellipse dont les axes principaux ne vont varier qu'avec l'altitude, c'est-à-dire que le seul paramètre qui va agir sur la taille de cette ellipse est R.

Comme on a fait précédemment pour expliquer les calculs de φ_s, λ_s , on présente dans la figure 9 un schéma correspondant au chemin suivi pour l'obtention des axes principaux du foot-print.

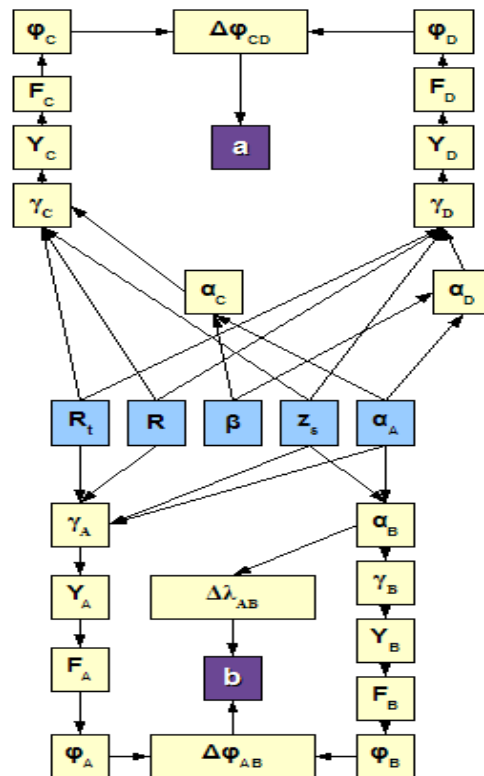


Figure 9 - Schéma d'interdépendance aboutissant à l'obtention des axes principaux a et b

En bleu sont représentés les paramètres de base, c'est-à-dire ceux qui sont fixés initialement : R_i, R, β et α .

En jaune pâle apparaissent les paramètres intermédiaires, ceux dont le calcul a servi pour aboutir à la longueur des axes principaux a et b représentés en couleur magenta.

Les calculs intermédiaires ont comme base le repérage de quatre points singuliers A, B, C et D considérés comme essentiels pour comprendre la géométrie dont il est question (cf. figure 10). Les points B, C et D correspondent aux intersections des axes principaux avec l'ellipse tandis que le point A représente l'intersection des axes principaux a et b , et correspond à l'intersection du faisceau radar considéré comme infiniment étroit (voir étude préliminaire simplifié) avec la sphère de rayon R .

L'objectif est donc de repérer les coordonnées relatives de ces points ($\varphi_A, \varphi_B, \lambda_A$ et λ_B), introduire celles-ci dans la formule de Haversine et obtenir ainsi les distances sphériques les séparant. Ces longueurs seront considérées comme les axes principaux de l'ellipse.

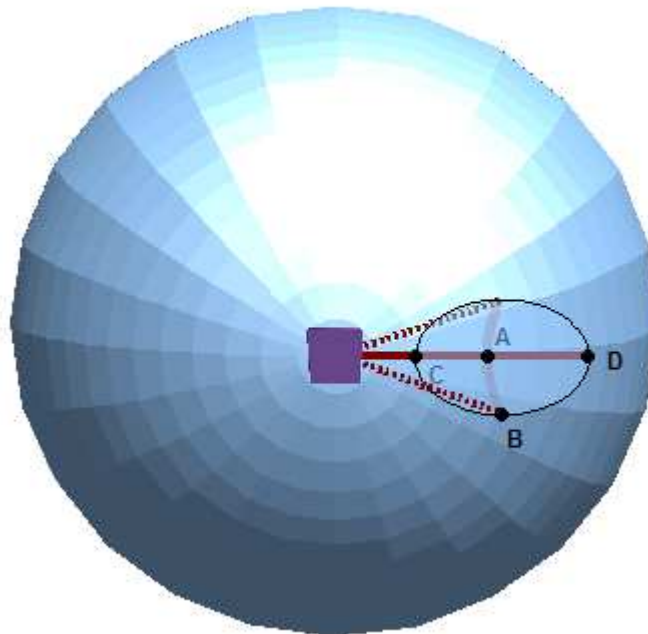


Figure 10 - Localisation des points A, B, C et D

Pour chacun des points A, B, C et D on a obtenu les paramètres présentés ci-dessous – X étant le point singulier :

- α_X : angle d'ouverture de l'antenne équivalent ce qui revient à l'angle entre les droites (SO) et (SX) (cf. figure 11).
- γ_X : angle d'incidence du faisceau sur la surface sphérique ou aussi l'angle, compris entre 0 et 90°, entre les droites (SX) et (OX).
- Y_X : Slant Path ou distance entre la position du satellite (point O) et le point singulier de l'ellipse (point X).
- F_X : Fauchée équivalente, soit la distance entre le point singulier X et la droite (SO).
- lat_X : latitude du point singulier X.

De même, la formule de Haversine nécessite d'introduire les différences de latitudes et longitudes entre les points dont on veut connaître l'écart sphérique. Je défini donc les paramètres suivants – X et Y étant deux points singuliers :

- $\Delta\varphi_{XY}$
- $\Delta\lambda_{XY}$

Il suffit alors d'introduire ces paramètres dans la formule afin d'obtenir la valeur de la distance sphérique souhaitée:

$$d_{XY} = 2R \cdot \sin^{-1} \left\{ \left[\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi_{XY}}{2} \right) + \cos(\varphi_X) \cdot \cos(\varphi_Y) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda_{XY}}{2} \right) \right]^{1/2} \right\}$$

➤ Calcul de l'axe elliptique a

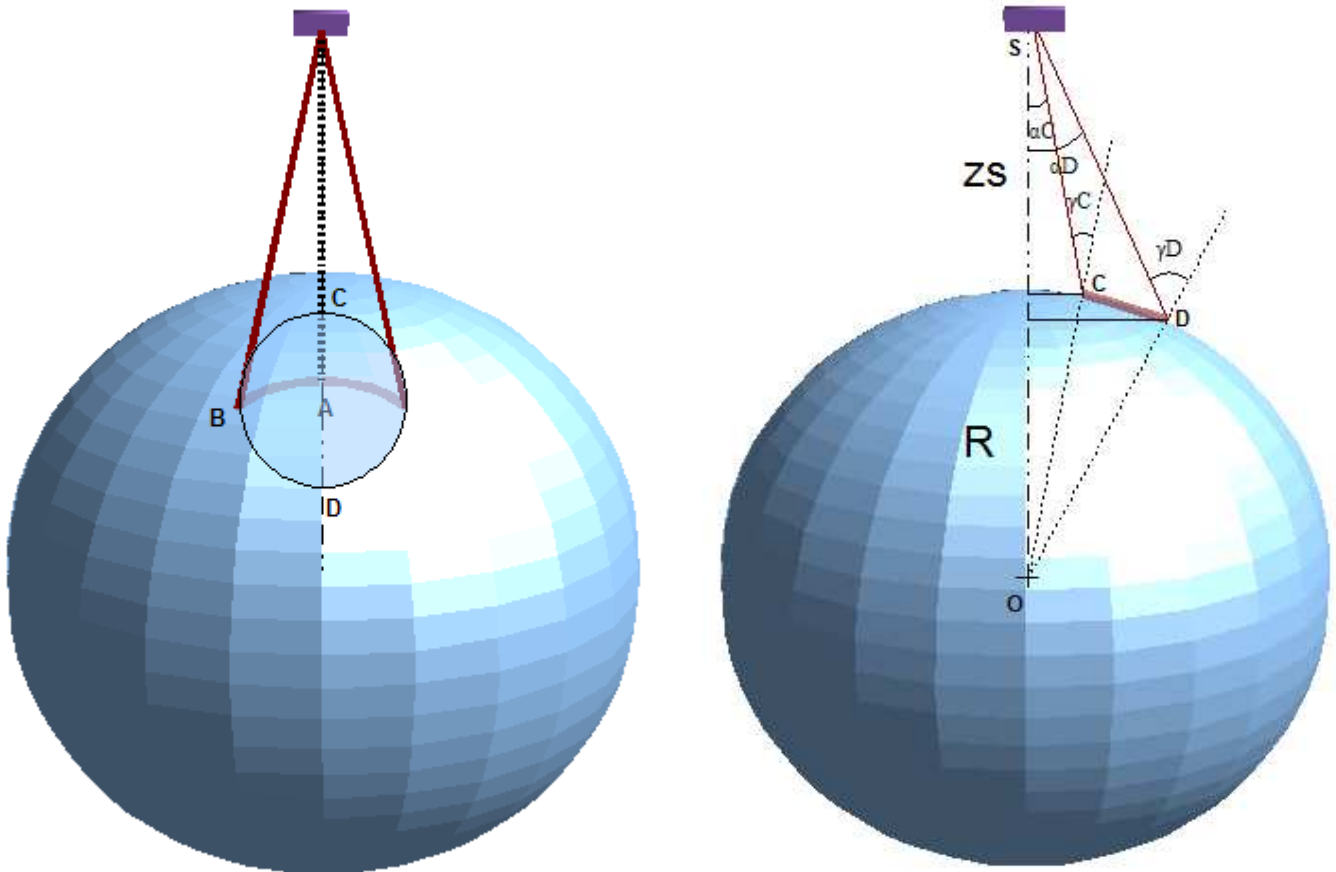
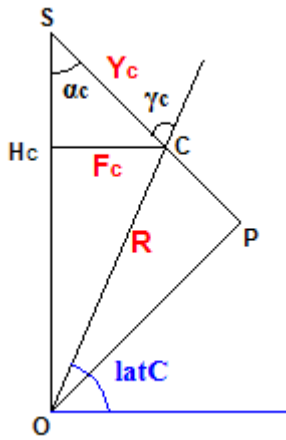


Figure 11 - Schéma géométrique permettant d'obtenir les coordonnées de C et D

L'angle d'ouverture équivalent de l'antenne pour le point singulier C est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\alpha_C = \alpha_A - \frac{\beta}{2}$$

Ensuite on présente la démonstration géométrique aboutissant à l'expression analytique de la latitude du point C.



Le point P est obtenu par prolongement de la droite (SC) afin d'obtenir le triangle SOP rectangle en P.

Le point H_C est la projection orthogonale du point C sur la droite (SO).

Dans le triangle COP, rectangle en P, on a :

$$OP = R \cdot \sin(\gamma_C) \text{ et } CP = R \cdot \cos(\gamma_C).$$

Dans le triangle SOP, rectangle en P, on a :

$$OP = SO \cdot \sin(\alpha_C) ;$$

$$\text{Or } SO = z_s + R_t$$

$$\text{Donc : } (z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C) = R \cdot \sin(\gamma_C)$$

$$\text{D'où : } \gamma_C = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C)}{R} \right].$$

Ensuite sur le même triangle SOP :

$$SP = SO \cdot \cos(\alpha_C)$$

$$\text{Or : } SP = SC + CP = Y_C + R \cdot \cos(\gamma_C)$$

Donc :

$$Y_C = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_C) - R \cdot \cos(\gamma_C) = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_C) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C)}{R} \right] \right\}$$

Dans le triangle SCH_C, rectangle en H_C, on a :

$$F_C = Y_C \cdot \sin(\alpha_C) = \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_C) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C)}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_C)$$

On obtient finalement la latitude du point C :

$$\varphi_C = 90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{F_C}{R} \right)$$

$$\Leftrightarrow \varphi_C = 90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{\left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos \left(\alpha_A - \frac{\beta}{2} \right) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin \left(\alpha_A - \frac{\beta}{2} \right)}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin \left(\alpha_A - \frac{\beta}{2} \right)}{R} \right)$$

Le chemin suivi pour aboutir à l'expression analytique de φ_D est le même que pour φ_C en considérant l'ouverture de l'antenne α_D telle que :

$$\alpha_D = \alpha_A + \frac{\beta}{2}$$

On obtient alors les expressions analytiques suivantes :

$$\gamma_D = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_D)}{R} \right]$$

$$Y_C = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_D) - R \cdot \cos(\gamma_D)$$

$$F_D = Y_D \cdot \sin(\alpha_D) = \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_D) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_D)}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_D)$$

$$\varphi_D = 90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{\left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A + \frac{\beta}{2}) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A + \frac{\beta}{2})}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_A + \frac{\beta}{2})}{R} \right)$$

On peut donc obtenir la différence de latitudes :

$$\Delta\varphi_{CD} = |\varphi_C - \varphi_D|$$

Comme on l'a précisé précédemment, on considère que la taille de l'ellipse est indépendante de la latitude et longitude de celle-ci. Il faut donc choisir une position du satellite telle que les calculs soient les plus simples possibles : sur un des pôles. Cette position particulière du satellite induit que, lorsque l'on projette le faisceau du radar sur la sphère, les points C et D ont la même longitude (angle par rapport au méridien de Greenwich) donc $\Delta\lambda_{CD}$ sera nul. C'est pour cette raison que ce paramètre n'apparaît pas dans le schéma d'interdépendance (cf. figure 9).

L'expression analytique de la distance sphérique entre les points C et D s'obtient à partir de la formule de Haversine :

$$a = CD = 2R \cdot \sin^{-1} \left\{ \left[\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi_{CD}}{2} \right) + \cos(\varphi_C) \cdot \cos(\varphi_D) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda_{CD}}{2} \right) \right]^{1/2} \right\} = R \cdot \Delta\varphi_{CD}$$

➤ Calcul de l'axe elliptique b

Le calcul de l'axe principal b est plus complexe que le précédent puisque les points A et B, utilisés comme référence, ne sont pas dans le même plan méridien comme il était question avec C et D.

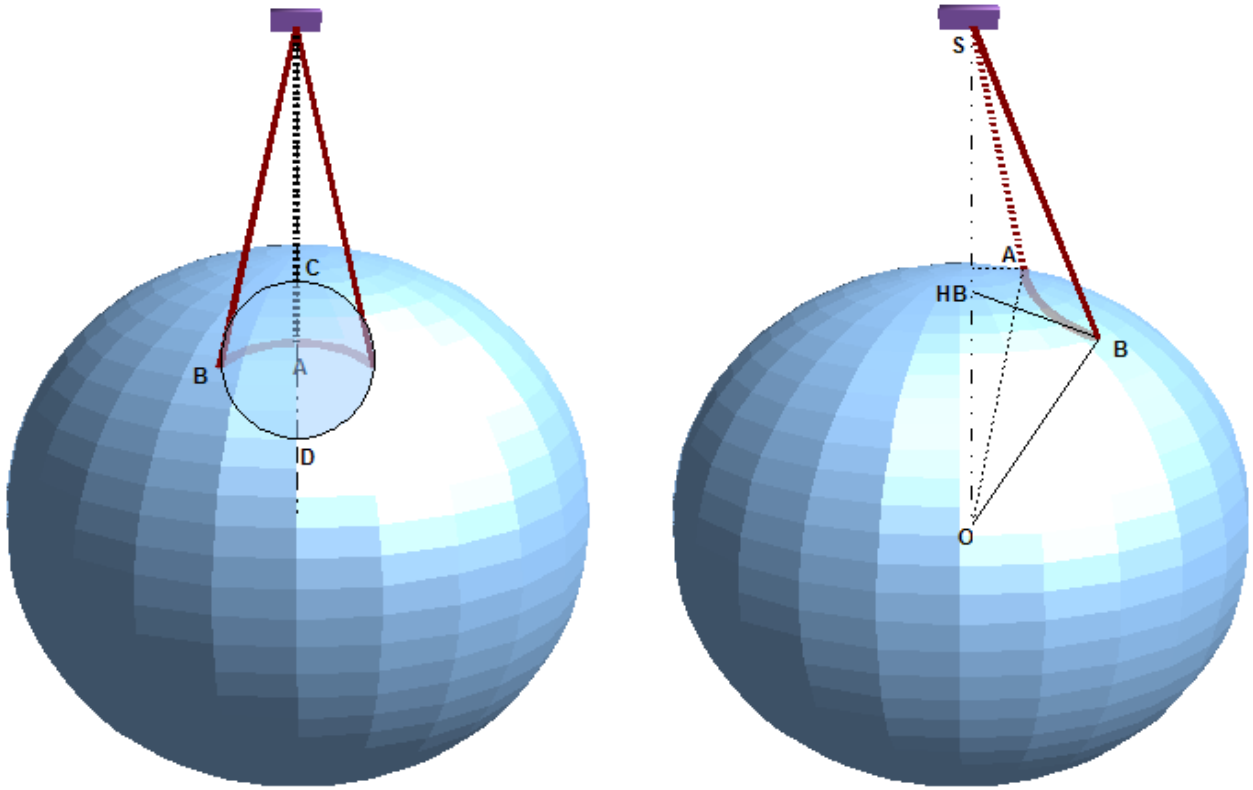


Figure 12 - Schéma géométrique permettant d'obtenir les coordonnées de A et B

La latitude du point A peut s'obtenir en utilisant la même méthode employée pour les points singuliers C et D. On obtient donc :

$$\gamma_A = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R} \right]$$

$$Y_A = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R \cdot \cos(\gamma_A)$$

$$F_A = Y_A \cdot \sin(\alpha_A)$$

$$\varphi_A = 90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{\left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_A)}{R} \right)$$

En ce qui concerne point B il faut commencer par calculer l'angle d'ouverture équivalent de l'antenne. La figure 13 permet d'illustrer la démonstration géométrique suivie. Le point HB est la projection orthogonale du point B sur la droite (SO), B' est le symétrique méridional de B et Q est le milieu du segment [BB'].

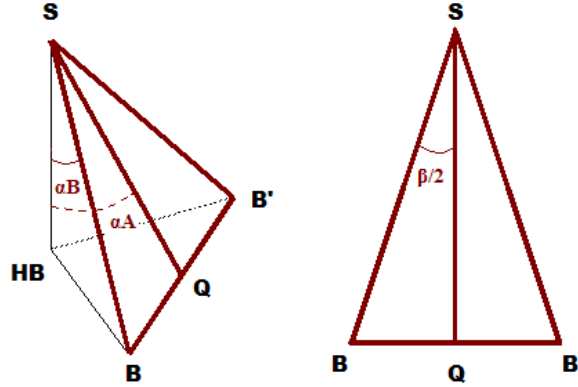


Figure 13 - Triangles permettant le calcul de α_B

En enchaînant des relations trigonométriques entre les triangles rectangles SBH_B , SQH_B et SBQ , on arrive à l'expression suivante de α_B :

$$\alpha_B = \cos^{-1} \left[\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos(\alpha_A) \right]$$

On obtient la latitude du point B en suivant la méthode employée pour les points A, C et D soit :

$$\gamma_B = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_B)}{R} \right]$$

$$Y_B = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_B) - R \cdot \cos(\gamma_B)$$

$$F_B = Y_B \cdot \sin(\alpha_B)$$

$$\varphi_B = 90^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{\left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_B) - R \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_B)}{R} \right] \right\} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_B)}{R} \right)$$

On peut maintenant déduire l'expression de la différence de latitude entre A et B :

$$\Delta\varphi_{AB} = |\varphi_A - \varphi_B|$$

Ensuite dans le triangle SBQ, rectangle en Q, on a :

$$BQ = Y_B \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Par ailleurs, dans le triangle SBH_B:

$$BH_B = Y_B \cdot \sin(\alpha_B)$$

Et finalement dans le triangle BQH_B

$$\Delta\lambda_{BQ} = \sin^{-1}\left(\frac{BQ}{BH_B}\right) = \sin^{-1}\left[\frac{\sin(\beta/2)}{\sin(\alpha_B)}\right]$$

Or on peut démontrer que $\Delta\lambda_{BQ} = \Delta\lambda_{AB}$

On peut donc conclure que :

$$\Delta\lambda_{BQ} = \sin^{-1}\left[\frac{\sin(\beta/2)}{\sin(\alpha_B)}\right]$$

L'expression analytique de l'axe principal b est donc, d'après Haversine :

$$b = 2 \cdot AB = 2 \cdot 2R \cdot \sin^{-1}\left\{\left[\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi_{AB}}{2}\right) + \cos(\varphi_A) \cdot \cos(\varphi_B) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda_{AB}}{2}\right)\right]^{1/2}\right\}$$

4.1.4. Position du foot-print

Après avoir obtenu les dimensions de l'empreinte du faisceau radar, on cherche à localiser celle-ci au fur et à mesure que le satellite se déplace et que l'antenne tourne. Les coordonnées du foot-print (φ, λ) seront fonction de celles du satellite (φ_s, λ_s) , soit :

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_s + \Delta\varphi \\ \lambda = \lambda_s + \Delta\lambda \end{cases}$$

Les paramètres $\Delta\varphi$ et $\Delta\lambda$, représentant respectivement la différence de latitude et longitude entre le satellite et le foot-print, vont être évidemment fonction de l'angle de balayage θ_{geo} de l'antenne.

Le schéma de la figure 14 illustre la démonstration géométrique permettant d'aboutir à l'expression analytique de $\Delta\varphi$ et $\Delta\lambda$. Les calculs intermédiaires sont les mêmes pour les deux paramètres en utilisant θ comme angle de balayage de l'antenne.

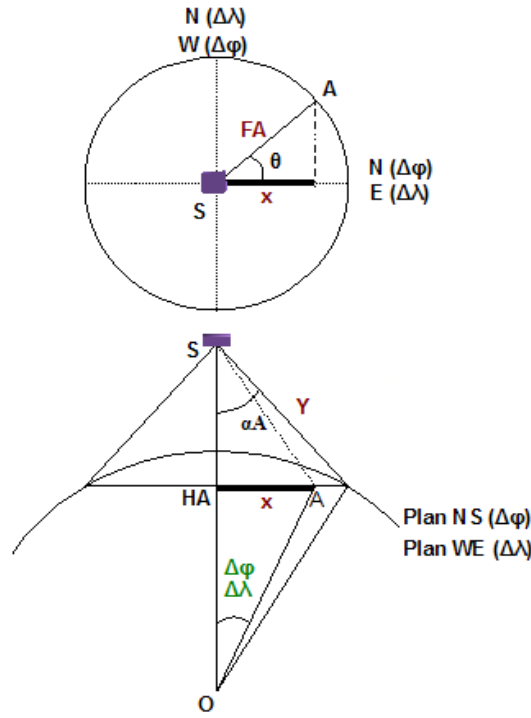


Figure 14 - Vue supérieure et frontale de la situation décrite

Il peut se démontrer facilement que :

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{F_A \cdot \cos(\theta)}{z_s + R_t - Y_A \cdot \cos(\alpha_A)} \right] \text{ avec } \theta = \theta_{geo}$$

$$\Delta\lambda = \tan^{-1} \left[\frac{F_A \cdot \cos(\theta)}{z_s + R_t - Y_A \cdot \cos(\alpha_A)} \right] \text{ avec } \theta = \theta_{geo} + 90^\circ$$

On peut donc conclure que les coordonnées sphériques localisant la position du foot-print à chaque instant sont :

$$\varphi = \varphi_s + \Delta\varphi = \frac{V_{sat_v}}{R_t + z_s} \cdot t + \tan^{-1} \left[\frac{F_A \cdot \cos(\theta_{geo})}{z_s + R_t - Y_A \cdot \cos(\alpha_A)} \right]$$

$$\lambda = \lambda_s + \Delta\lambda = \tan^{-1} \left[\frac{F_A \cdot \cos(\theta_{geo} + 90^\circ)}{z_s + R_t - Y_A \cdot \cos(\alpha_A)} \right]$$

4.2. Modélisation des signaux radar

4.2.1. Définition des paramètres utilisés

Les paramètres qui nous ont servi à modéliser le fonctionnement du radar sont les suivants :

- **PRF** : le Pole Repetition Frequency est la fréquence d'émission de pulses du radar. Il est fixé initialement à 3000 Hz.
- **l_{porte}** : longueur des portes du faisceau radar. En tenant compte de l'ouverture du faisceau on obtient un volume déterminé (tronc de cône) qui augmente proportionnellement avec la distance au radar. Chaque unité de volume représente un pulse. Tout système en mouvement se situant dans ce volume va provoquer des perturbations dans les caractéristiques de ce pulse. La longueur de la porte est fixée initialement à 250m.
- **t_{porte}** : durée du pulse. Une fois fixée la longueur des portes désirée et connaissant la vitesse de la lumière, le calcul du temps de porte est immédiat. Soit :

$$t_{\text{porte}} = \frac{l_{\text{porte}}}{V_{\text{lum}}} ; \text{ Avec } V_{\text{lum}} = 6 \cdot 10^8 \text{ m/s} .$$

4.2.2. Traitement du signal

Le traitement des données fournies par le radar passe par l'analyse temporelle de celui-ci. Il devient indispensable de connaître exactement l'intervalle dans lequel l'écho du signal émis va être reçu.

On considère pour les calculs qui suivent que le faisceau radar émis par l'antenne est infiniment petit, R_{\min} et R_{\max} étant respectivement le rayon minimal et le rayon maximal entre lesquels on souhaite obtenir une information sur les hydrométéores en mouvement (nuages, gouttes de pluie ou glace), on peut définir les longueurs des faisceau (« Slant Path ») correspondants :

$$Y_{\min} = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\max} \cdot \cos(\gamma_{\min}) \text{ avec } \gamma_{\min} = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\max}} \right]$$

$$Y_{\max} = (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\min} \cdot \cos(\gamma_{\max}) \text{ avec } \gamma_{\max} = \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\min}} \right]$$

Une fois définies les distances maximales et minimales parcourues par le signal et connaissant la vitesse de propagation des ondes émises par l'antenne (vitesse de la lumière), on peut définir l'intervalle temporel dans lequel vont être reçus les hypothétiques échos du signal :

$$\frac{2 \cdot Y_{\min}}{V_{\text{lum}}} \leq t - t_0 \leq \frac{2 \cdot Y_{\max}}{V_{\text{lum}}}$$

t_0 étant l'instant où le pulse est émis.

En remplaçant Y_{\min} et Y_{\max} par ses valeurs, on obtient :

$$\frac{2 \cdot \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\max} \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\max}} \right] \right\} \right\rangle}{V_{lum}} \leq t - t_0 \leq \frac{2 \cdot \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\min} \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\min}} \right] \right\} \right\rangle}{V_{lum}}$$

Il faut souligner que le satellite ne s'arrête pas jusqu'à ce que le signal revienne, il continue son mouvement orbital autour de la Terre et le radar poursuit son échantillonnage. La distance d parcourue par la plateforme spatiale pendant l'intervalle d'écho peut être calculée, de façon simplifiée, grâce à l'expression suivante:

$$d = V_{sat} \cdot (t - t_0)$$

D'où :

$$V_{sat} \cdot \frac{2 \cdot \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\max} \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\max}} \right] \right\} \right\rangle}{V_{lum}} \leq d \leq V_{sat} \cdot \frac{2 \cdot \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_A) - R_{\min} \cdot \cos \left\{ \sin^{-1} \left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_A)}{R_{\min}} \right] \right\} \right\rangle}{V_{lum}}$$

En effet on a considéré l'hypothèse que le satellite se déplace en ligne droite avec une vitesse V_{sat} ce qui est relativement proche de la situation réelle du fait que le rayon orbital est très grand.

On peut également estimer, connaissant la fréquence de répétition (PRF), un encadrement du nombre de pulses n émis après le premier signal :

$$\frac{2 \cdot Y_{\min} \cdot PRF}{V_{lum}} \leq n \leq \frac{2 \cdot Y_{\max} \cdot PRF}{V_{lum}}$$

Les systèmes en mouvement dont on veut quantifier la cinématique sont situés dans la basse atmosphère ce qui correspond à des rayons entre $R_{\min} = 6400km$ et $R_{\max} = 6425km$ depuis le centre de la Terre. En inclinant l'antenne d'un angle $\alpha_A = 45^\circ$ et situant le satellite à une altitude moyenne de $z_s = 500km$ avec une vitesse moyenne orbitale de $7km/s$, on obtient les encadrements suivants :

$$\begin{aligned} 4.6735 \cdot 10^{-3} s &\leq t - t_0 \leq 4.9292 \cdot 10^{-3} s \\ 32.7m &\leq d \leq 34.5m \\ 14.012 &\leq n \leq 14.788 \end{aligned}$$

La mise en place de systèmes électroniques sophistiqués au sein de la plateforme spatiale est donc nécessaire afin que l'émission et la réception du signal se fassent par le biais de la même antenne même si le satellite s'est déplacé de plus de $30m$ pendant le temps d'écoute.

Finalement l'encadrement de n nous permet de conclure que le signal d'écho arrivera entre le 14^{ème} et le 15^{ème} pulse après son émission.

Dans le triangle STM , on a :

$$\cos(\beta/2) = \frac{ST}{SC} \Leftrightarrow ST = SC \cdot \cos(\beta/2) = Y_C \cdot \cos(\beta/2)$$

$$\Leftrightarrow ST = \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_C) - R \cdot \cos\left\{\sin^{-1}\left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C)}{R}\right]\right\} \right\rangle \cdot \cos(\beta/2)$$

De même, dans le triangle SMH_M rectangle en H_M , on retrouve que :

$$MH_M = SM \cdot \sin(\alpha_A) = \left\langle \left\langle (z_s + R_t) \cdot \cos(\alpha_C) - R \cdot \cos\left\{\sin^{-1}\left[\frac{(z_s + R_t) \cdot \sin(\alpha_C)}{R}\right]\right\} \right\rangle \cdot \cos(\beta/2) - \frac{V_{lum} \cdot t_{porte}}{2} \right\rangle \cdot \sin(\alpha_A)$$

Or, d'après Pythagore, on peut établir que dans le triangle OMH_M :

$$OM = \sqrt{MH_M^2 + [(R_t + z_s) - SM \cdot \cos(\alpha_A)]^2}$$

Par ailleurs : $NM = OM - R_t$

Donc on peut conclure que :

$$h_{sombre} = NM = \sqrt{MH_M^2 + [(R + z_s) - SM \cdot \cos(\alpha_A)]^2} - R_t$$

4.3. Résultats des simulations

Jusqu'à présent on a exposé les différents développements analytiques qui ont permis de caractériser les éléments du simulateur (orbitographie, échantillonnage, etc.). Il est nécessaire d'obtenir des résultats numériques de façon à pouvoir choisir le paramétrage convenable pour le but final du satellite.

Les paramètres considérés comme de base sont fixés initialement (tableau xx) et vont rester constants pendant toute la simulation. Certains comme le rayon de la Terre ne peuvent pas être variés. Dans d'autres simulations, il pourrait être intéressant d'analyser en profondeur, la sensibilité du reste de paramètre face à la variation de l'altitude du satellite.

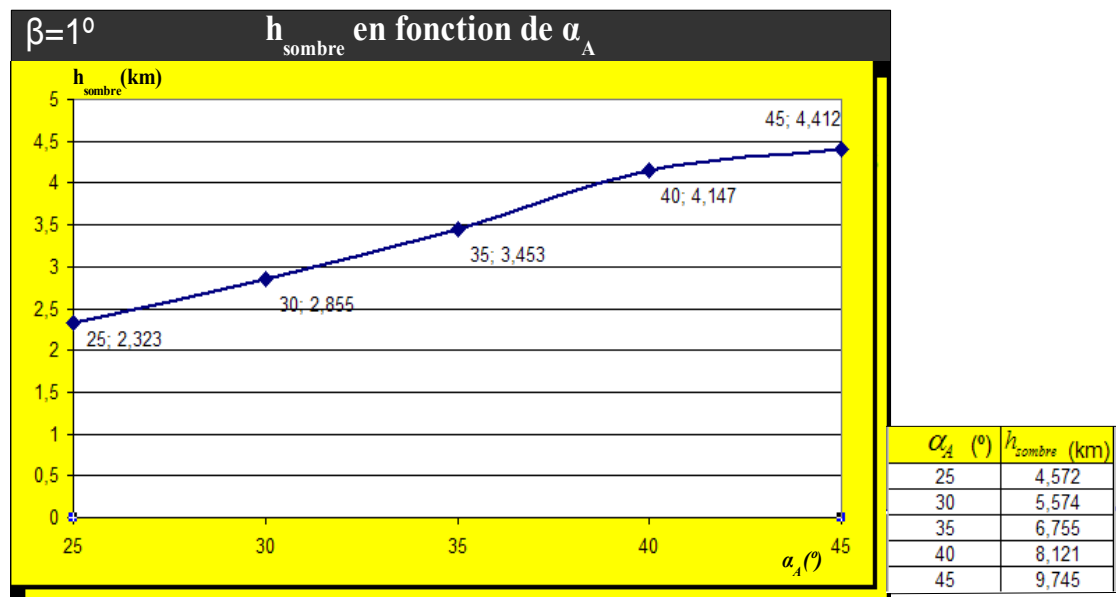
Paramètre base	Valeur
R_t	6400 km
R	6415 km
z_s	500 km
V_{sat}	7 km/s
PRF	3000 Hz
V_{lum}	$3 \cdot 10^5$ km/s
l_{porte}	250 m
t_{porte}	$8.34 \cdot 10^{-7}$ km

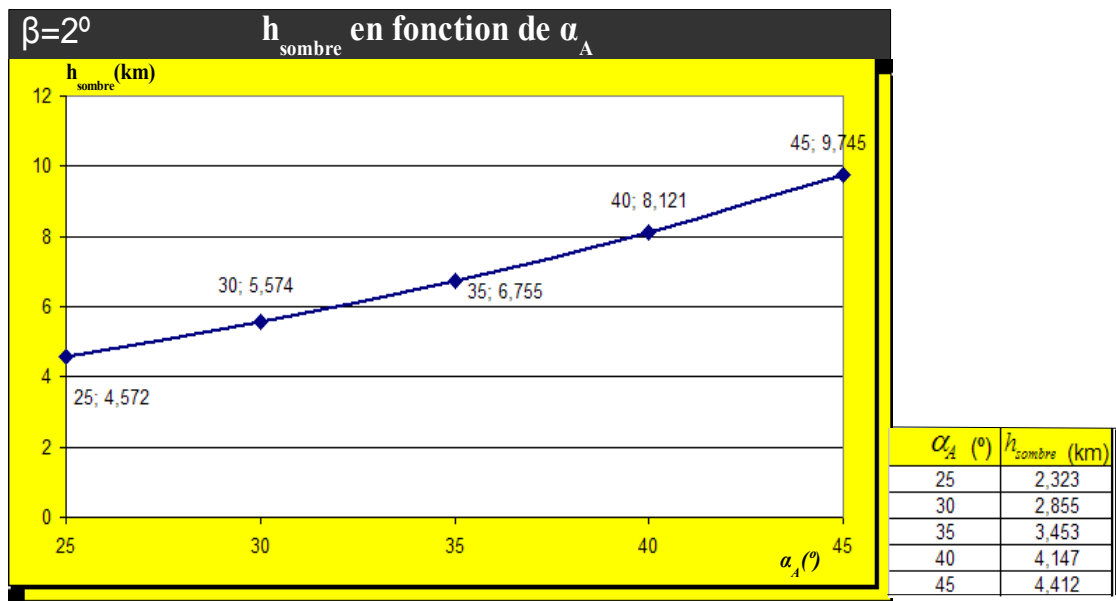
Dans un premier temps on va analyser comment varient les différents paramètres en fonction de l'angle d'ouverture du signal en le faisant prendre deux valeurs différentes :

Paramètre base	Valeur	Paramètre base	Valeur
α_A	25°	α_A	45°
β	1°	β	1°
γ_A	27.2°	γ_A	49.8°
Y_A	539.9 km	Y_A	716.1 km
F_A	456.4 km	F_A	506.4 km
a	5.29 km	a	9.69 km
b	6.47 km	b	10.23 km

On observe que, comme on a vu précédemment dans les diagrammes d'interdépendance, la variation d'un seul des paramètres de base provoque des perturbations considérables dans le reste. En effet, la réduction de l'angle d'ouverture du faisceau en 20°, tout en fixant l'angle du faisceau β , fait diminuer de presque la moitié l'angle d'incidence à une altitude de 15km. Ceci fait aussi réduire en presque 200 km la longueur du faisceau et la fauchée du radar diminue en 50 km.

Ce qui nous intéresse maintenant c'est analyser la sensibilité de la hauteur sombre face aux variations de l'angle d'ouverture de l'antenne α_A et de l'angle d'ouverture du faisceau β .





Pour les deux cas on observe une augmentation progressive de la hauteur sombre lorsque l'angle d'ouverture de l'antenne passe de 25 à 45°. Entre ces deux valeurs de α_A , la zone de mesures non valables double sa valeur ce qui est une variation considérable tenant en compte que les études climatologiques visent principalement aux 20 premiers kilomètres de l'atmosphère. Cette relation intrinsèque entre ces deux paramètres est fondamentale dans la recherche des paramètres optimaux régissant le satellite et son radar.

On constate également qu'une augmentation de 1° dans l'ouverture du faisceau β provoque une augmentation de facteur 2 de l'hauteur sombre. Il est donc évident que ce paramètre joue un rôle absolument pas négligeable dans la caractérisation du satellite puisque, dû à l'altitude à laquelle se situe la plateforme, la sensibilité de la hauteur sombre est énorme par rapport à β .

Suite au codage de l'algorithme du simulateur en langage FORTRAN, un logiciel de dessin effectue le tracé des empreintes du radar à une certaine altitude au fur et à mesure que le satellite et l'antenne suivent leur mouvement imposé. Le logiciel GMT permet de visualiser les résultats obtenus à partir d'un fichier où apparaissent les coordonnées sphériques et la taille des « ellipses » au cours du temps.

Finalement sont présentées deux simulations d'échantillonnage à une altitude de 15 km pour deux angles d'ouverture de l'antenne différents. On représente, grâce à une échelle de couleurs, la variation de la Vitesse Doppler en fonction de la position du foot-print au sein du domaine d'échantillonnage. Cette magnitude est calculée dans les deux cas pour un champ de vitesse horizontal uniforme dans tout le domaine, avec :

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ m/s}$$

De même on considère une vitesse de chute des gouttes de pluie nulle : $V_r = 0$ m/s.

Ces valeurs arbitraires nous permettent ainsi de pouvoir valider cette étape de la construction du simulateur.

$\alpha_A = 45^\circ$

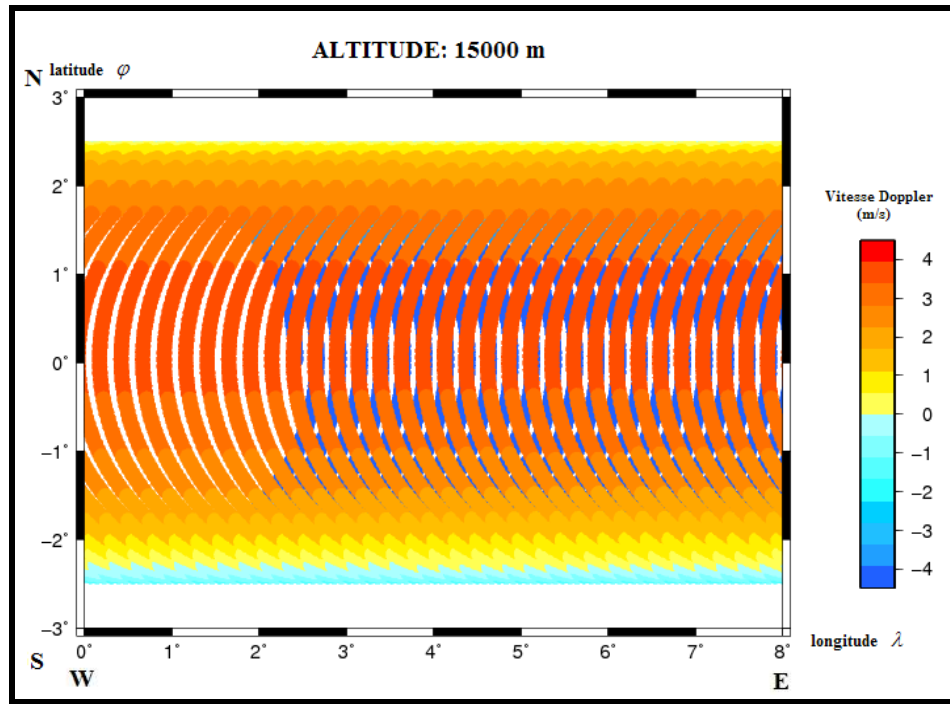


Figure 16 - Simulation de l'échantillonnage du radar pour $\alpha_A = 45^\circ$

$\alpha_A = 25^\circ$

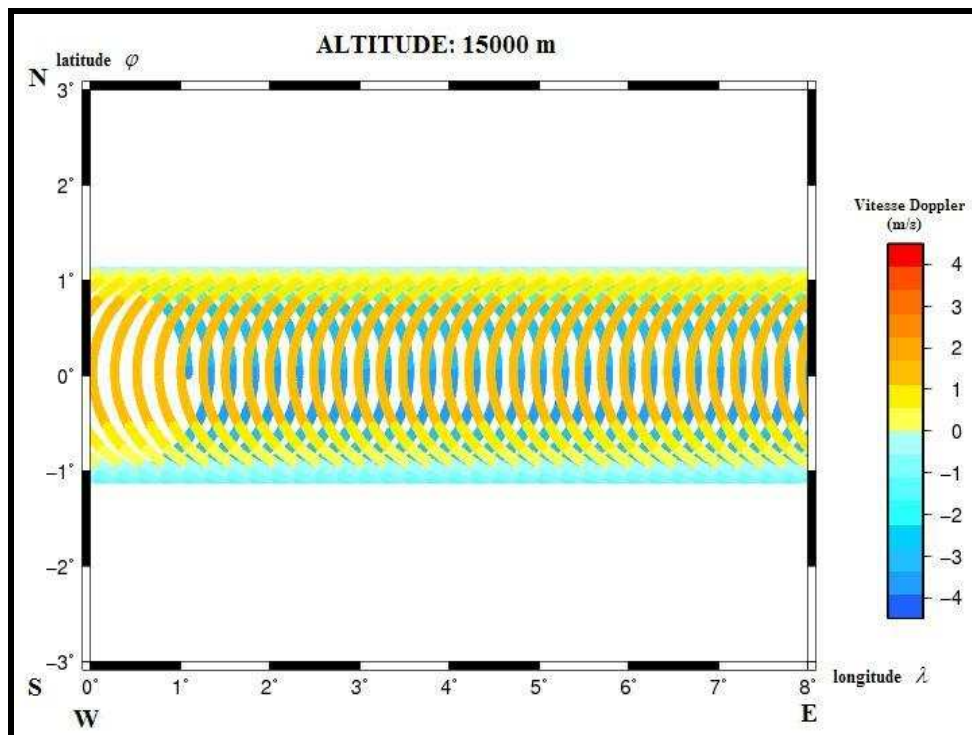


Figure 17 - Simulation de l'échantillonnage du radar pour $\alpha_A = 25^\circ$

Dans un premier temps, on observe que, comme il est facilement démontrable théoriquement, le domaine d'échantillonnage est d'autant plus étroit (dans la direction perpendiculaire à la direction de déplacement du satellite) que l'angle d'ouverture de l'antenne est petit.

Dans chaque empreinte du radar, le simulateur calcule la projection du vecteur vitesse défini précédemment sur le vecteur faisceau. On constate deux symétries dans le calcul de la Vitesse Doppler, une par rapport à l'axe de déplacement du satellite (latitude 0°) et une deuxième entre les mesures du premier et deuxième passage du faisceau dans une zone déterminée. En effet, comme on a expliqué dans la première partie de ce rapport, l'antenne balaye deux fois la même zone avec des angles différents. Ainsi, un point situé sur l'axe $\varphi = 0^\circ$ peut être atteint par le faisceau une première fois lorsque l'angle de balayage θ (mesuré par rapport au Nord) est 0° puis une deuxième fois lorsque ce dernier est égal à 180° . Or, la composante verticale du vecteur vitesse est nulle (champ horizontal), deux projections de ce vecteur provenant de deux positions opposées de l'antenne sont forcément de même valeur et de signe contraire, d'où les symétries observées dans les simulations présentées ci-dessus.

5. APPLICATION DU SIMULATEUR : RECONSTITUTION D'UN CHAMP DE VENT

Le simulateur du satellite nous permet, tout en définissant une orbite pour la plateforme, d'obtenir la position et les dimensions des empreintes du faisceau radar pour chaque altitude. On va donc savoir, pour un paramétrage initial fixé, quelle est la localisation des domaines d'échantillonnage où l'on peut obtenir une information sur la cinématique d'un système en mouvement (nuages, pluie, vent, etc.).

L'avantage du radar doppler est qu'il permet de reconstituer un champ de vitesse à partir uniquement des perturbations de fréquence observées dans le signal reçu par rapport au signal émis. On va tester le potentiel du simulateur en reconstituant un champ de vent préalablement fixé (vitesses Doppler obtenues en projetant ce champ de vent sur les directions de visée et les portes radar) ce qui nous permettra d'établir le meilleur paramétrage possible pour obtenir la précision de reconstitution requise.

5.1. Maillage

Avant de procéder à la reconstitution du champ, il est nécessaire de mailler notre domaine d'échantillonnage sachant évidemment que plus la résolution du maillage est forte, plus le champ de vent reconstruit va être fidèle à la réalité (mieux résolu). Néanmoins on verra par la suite que plus les éléments de maille sont petits et moins les empreintes seront nombreuses à l'intérieur d'entre elles. Or il est nécessaire pour pouvoir reconstituer le champ de vent d'avoir plusieurs mesures de vitesse Doppler non-colinéaires. Il faut donc trouver un compromis entre ces deux contraintes permettant l'obtention d'un résultat final raisonnable.

5.2. Protocole suivi

La validation et l'étude de sensibilité de la reconstitution d'un champ de vitesse comporte plusieurs étapes de développement et de validation. Celles-ci sont présentées sous forme d'un schéma (cf. figure 18) permettant de synthétiser l'ordre suivi dans le protocole.

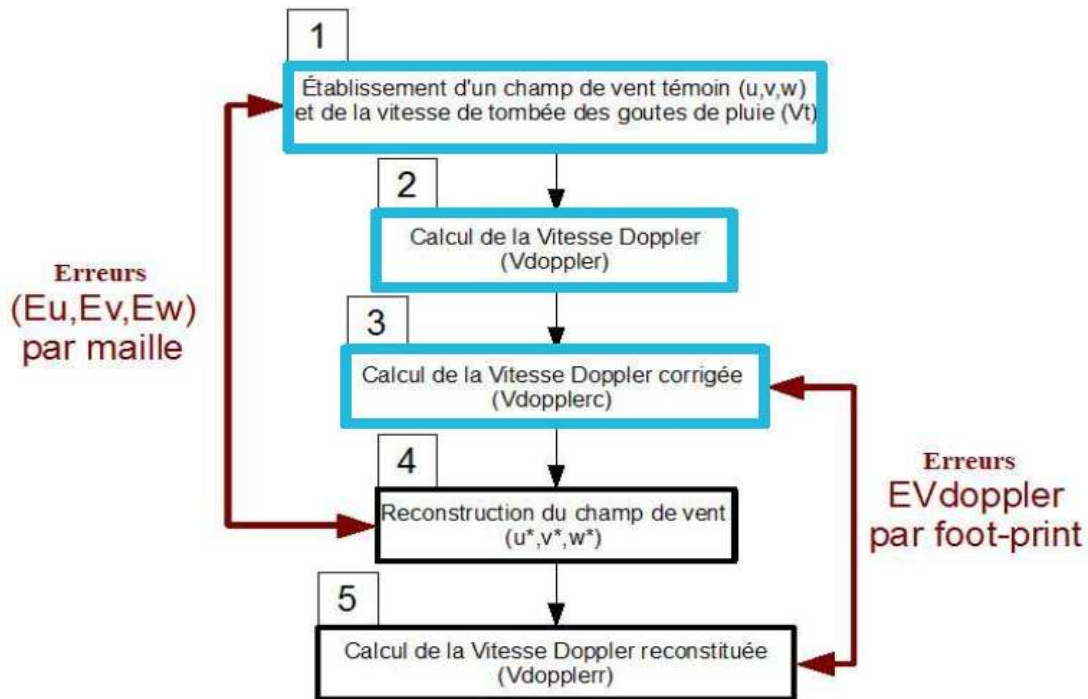


Figure 18 - Étapes suivies dans l'établissement et reconstitution du champ de vent

🚧 Étape 1 : Champ de vent témoin

Afin de vérifier le bon fonctionnement de la simulation, on établit premièrement un champ de vent témoin lequel sera l'objet de la reconstitution. Il s'agit d'un champ tridimensionnel dont les composantes (u, v, w) sont fonction par exemple des coordonnées (latitude, longitude et altitude).

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 6 \\ 2 \end{pmatrix} \text{ m/s}$$

Il faut de même tenir compte de la vitesse de chute des gouttes de pluie (V_t) qui sont les cibles du radar. Dans le but de simplifier les calculs, on fixera une valeur arbitraire pour ce paramètre. Dans la réalité il suffit de connaître la réflectivité z (déduite de l'intensité du signal radar réfléchi) en chaque point pour obtenir directement V_t à partir de la formule :

$$V_t = C_1 \cdot z^{C_2}$$

C_1 et C_2 étant des constantes dont on connaît la valeur.

✚ Étape 2 : Vitesse Doppler

Dans cette étape on synthétise la valeur de la Vitesse Doppler mesuré à partir du champ de vent témoin. Pour cela on applique l'expression analytique rappelée dans la partie « Rappels théoriques » :

$$V_{doppler} = L_1 \cdot u + L_2 \cdot v + L_3 \cdot (w - V_t)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} L_1 = \sin(\alpha_A) \cdot \cos(\theta_{geo}) \\ L_2 = \sin(\alpha_A) \cdot \sin(\theta_{geo}) \\ L_3 = -\cos(\alpha_A) \end{cases}$$

✚ Étape 3 : Vitesse Doppler corrigée

Puisque l'on s'intéresse à la reconstitution du champ de vent, il est préalablement nécessaire de retrancher à la vitesse Doppler mesurée la contribution de la vitesse propre de chute des gouttes de pluies ce qui conduit à :

$$V_{dopplerc} = V_{doppler} + L_3 \cdot V_t$$

✚ Étape 4 : Reconstitution du champ de vitesse

On procède alors à la reconstitution du champ témoin en partant de la Vitesse Doppler corrigée $V_{dopplerc}$ pour tout point du domaine d'échantillonnage. Pour cela on utilise la méthode des moindres carrés qui consiste à obtenir le champ (u^*, v^*, w^*) qui minimise l'expression suivante (moindre carré) :

$$\sum_i \{V_{dopplerc} - [L_1 \cdot u^* + L_2 \cdot v^* + L_3 \cdot w^*]\}^2 = f(u^*, v^*, w^*) \equiv \text{Minimum}$$

Cela revient à dire que les dérivées de cette expression par rapport aux composantes du vecteur vitesses reconstitué doivent être nulles, soit :

$$\begin{cases} \frac{\delta f}{\delta u^*} = 0 \Leftrightarrow \sum_i (-L_{1i} \cdot V_{dopplerc} + L_{1i}^2 \cdot u^* + L_{1i} \cdot L_{2i} \cdot v^* + L_{1i} \cdot L_{3i} \cdot w^*) = 0 \\ \frac{\delta f}{\delta v^*} = 0 \Leftrightarrow \sum_i (-L_{2i} \cdot V_{dopplerc} + L_{1i} \cdot L_{2i} \cdot u^* + L_{2i}^2 \cdot v^* + L_{2i} \cdot L_{3i} \cdot w^*) = 0 \\ \frac{\delta f}{\delta w^*} = 0 \Leftrightarrow \sum_i (-L_{3i} \cdot V_{dopplerc} + L_{1i} \cdot L_{3i} \cdot u^* + L_{2i} \cdot L_{3i} \cdot v^* + L_{3i}^2 \cdot w^*) = 0 \end{cases}$$

On cherche donc à résoudre le système matriciel $A \cdot X = B$ suivant :

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sum_i L_{1i}^2 & \sum_i L_{1i} \cdot L_{2i} & \sum_i L_{1i} \cdot L_{3i} \\ \sum_i L_{1i} \cdot L_{2i} & \sum_i L_{2i}^2 & \sum_i L_{2i} \cdot L_{3i} \\ \sum_i L_{1i} \cdot L_{3i} & \sum_i L_{2i} \cdot L_{3i} & \sum_i L_{3i}^2 \end{pmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} u^* \\ v^* \\ w^* \end{pmatrix}}_X = \underbrace{\begin{pmatrix} \sum_i L_{1i} \cdot V_{dopplerc} \\ \sum_i L_{2i} \cdot V_{dopplerc} \\ \sum_i L_{3i} \cdot V_{dopplerc} \end{pmatrix}}_B$$

On résout le système matriciel en réalisant une inversion de la matrice A et en effectuant le produit matriciel $X = A^{-1} \cdot B$ et obtient ainsi le vecteur solution (u^*, v^*, w^*)

🔧 Étape 5 : Calcul de la Vitesse Doppler reconstituée

Une fois reconstitué le champ de vent, on passe à l'étape de validation dont le premier pas est de recalculer la Vitesse Doppler en tout élément de maille, à partir du champ de vent (u^*, v^*, w^*) obtenu précédemment, soit :

$$V_{dopplerr} = L_1 \cdot u^* + L_2 \cdot v^* + L_3 \cdot w^*$$

🔧 Densité de points et calcul des erreurs

La densité de points correspond au nombre d'empreintes par unité de maille. L'obtention de ce paramètre permet de justifier partiellement la variabilité des erreurs qu'on présentera dans la suite, mais est également indispensable pour des applications de reconstitution de champs de pluie. En effet un radar spatial comme celui dont il est question dans ce projet permet aussi d'analyser la pluviométrie dans une zone déterminée à partir de la mesure de l'intensité du signal écho reçu par l'antenne. Il est indispensable que la densité de points de mesure soit importante dans chaque maille de façon à obtenir une précision acceptable.

Afin de vérifier le bon fonctionnement du simulateur de reconstitution, on cherche à calculer les erreurs commises lors de l'obtention du champ de vent (u^*, v^*, w^*) . On peut quantifier ces erreurs en comparant les composantes du vecteur vitesse dans chaque maille ou bien en comparant la Vitesse Doppler dans chaque empreinte.

- $(Eu, Ev, Ew) = |(u, v, w) - (u^*, v^*, w^*)| \equiv$ Différence absolue entre le champ témoin et le champ reconstitué pour chaque élément de maille.
- Différence absolue entre la vitesse doppler calculée à partir du champ témoin et celle obtenue en introduisant le champ reconstitué.

On se limitera ici au calcul du premier type d'erreur présenté.

L'obtention des erreurs permet de fixer les paramètres de base de façon à optimiser les résultats tout en respectant le compromis avec le reste des contraintes.

5.3. Résultats

5.3.1. Densité des points de mesure

Pour mieux quantifier l'interdépendance entre les paramètres qui régissent ce simulateur, on comparera la variabilité des erreurs de reconstitution et la densité de points de mesure pour deux valeurs différentes de l'angle d'ouverture de l'antenne : $\alpha_A = 25^\circ$ et $\alpha_A = 45^\circ$. Pour chaque cas on étudiera l'effet de la variation de la précision de maillage sur les erreurs en

réalisant une simulation avec un maillage fin ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) puis un autre avec un maillage beaucoup plus large ($3.5^\circ \times 3.5^\circ$).

On rappelle que le satellite se déplace d'Ouest en Est et que les composantes du vecteur vent sont « u » (Nord-Sud), « v » (Est-Ouest) et « w » (en Altitude).

Note :

Même si ce n'est pas dans le cadre précis de ce projet, la densité de points de mesure est un paramètre régissant la précision de reconstitution d'un champ de pluie. En effet, plus on a d'empreintes dans la maille définie et plus on obtiendra des résultats qui s'approchent à la réalité.

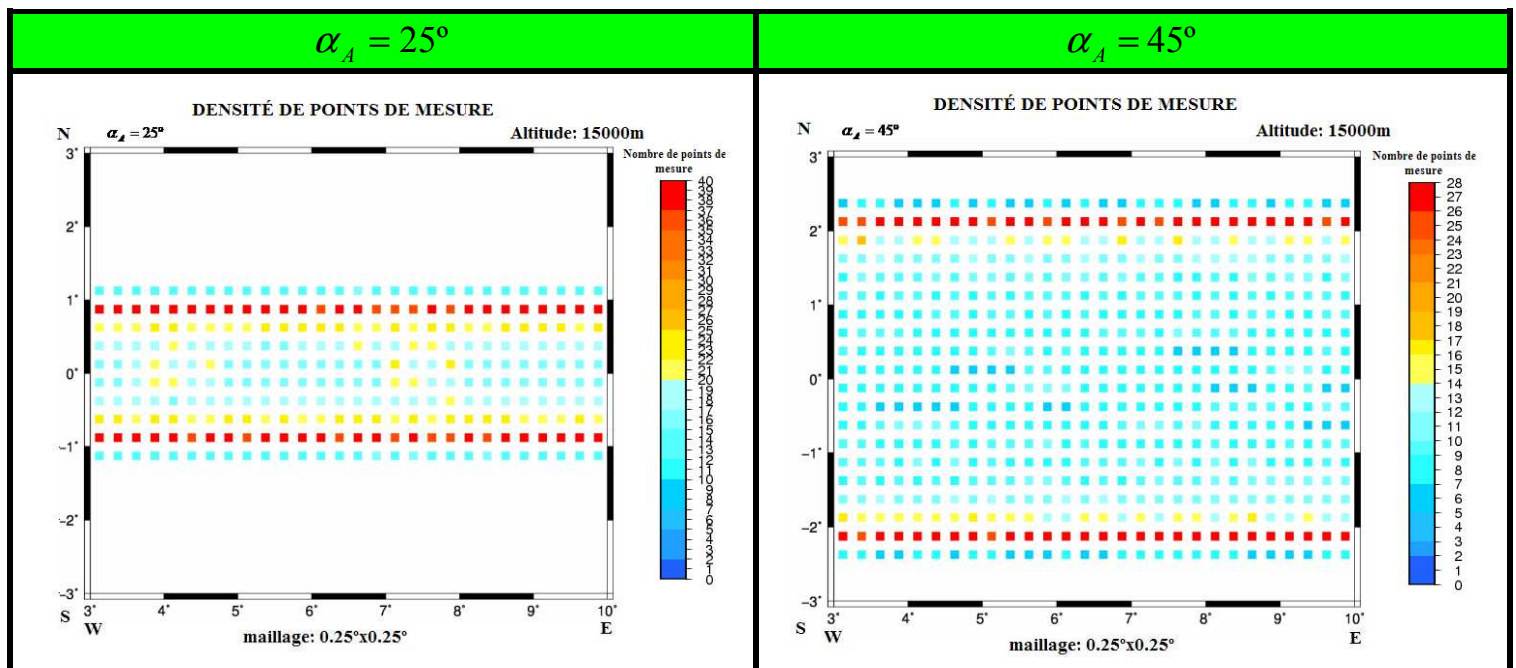


Figure 19 - Densité de points de mesures obtenus pour $\alpha_A = 25^\circ$ et $\alpha_A = 45^\circ$

On observe dans les deux cas une distribution des densités de points de mesure symétrique par rapport à l'axe de déplacement du satellite (latitude 0°). On peut ainsi distinguer des bandes de densité homogène, dont la valeur augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe central jusqu'à atteindre son maximum. Finalement on remarque aux extrêmes Nord et Sud une bande étroite où la densité moyenne est semblable à celle de la bande centrale. Toute cette distribution est étroitement liée à la géométrie du balayage donc on peut considérer les résultats obtenus comme cohérents avec la réalité.

Pour les valeurs des paramètres de base imposées dans ces simulations, on obtient pour $\alpha_A = 25^\circ$, un maximum de 40 points et un minimum de 10. Du fait d'augmenter l'angle d'ouverture de l'antenne à $\alpha_A = 45^\circ$, la densité moyenne de points de mesure par bandes diminue fortement, le maximum et le minimum pour ce cas se situant respectivement à 28 et 7 points par maille. En effet lorsque l'on diminue l'angle d'ouverture de l'antenne, on obtient forcément un domaine d'échantillonnage plus étroit mais en même temps on fait augmenter considérablement la concentration de points sur celui-ci, d'où les résultats obtenus.

5.3.2. Erreur dans la reconstitution de « u » et « v »

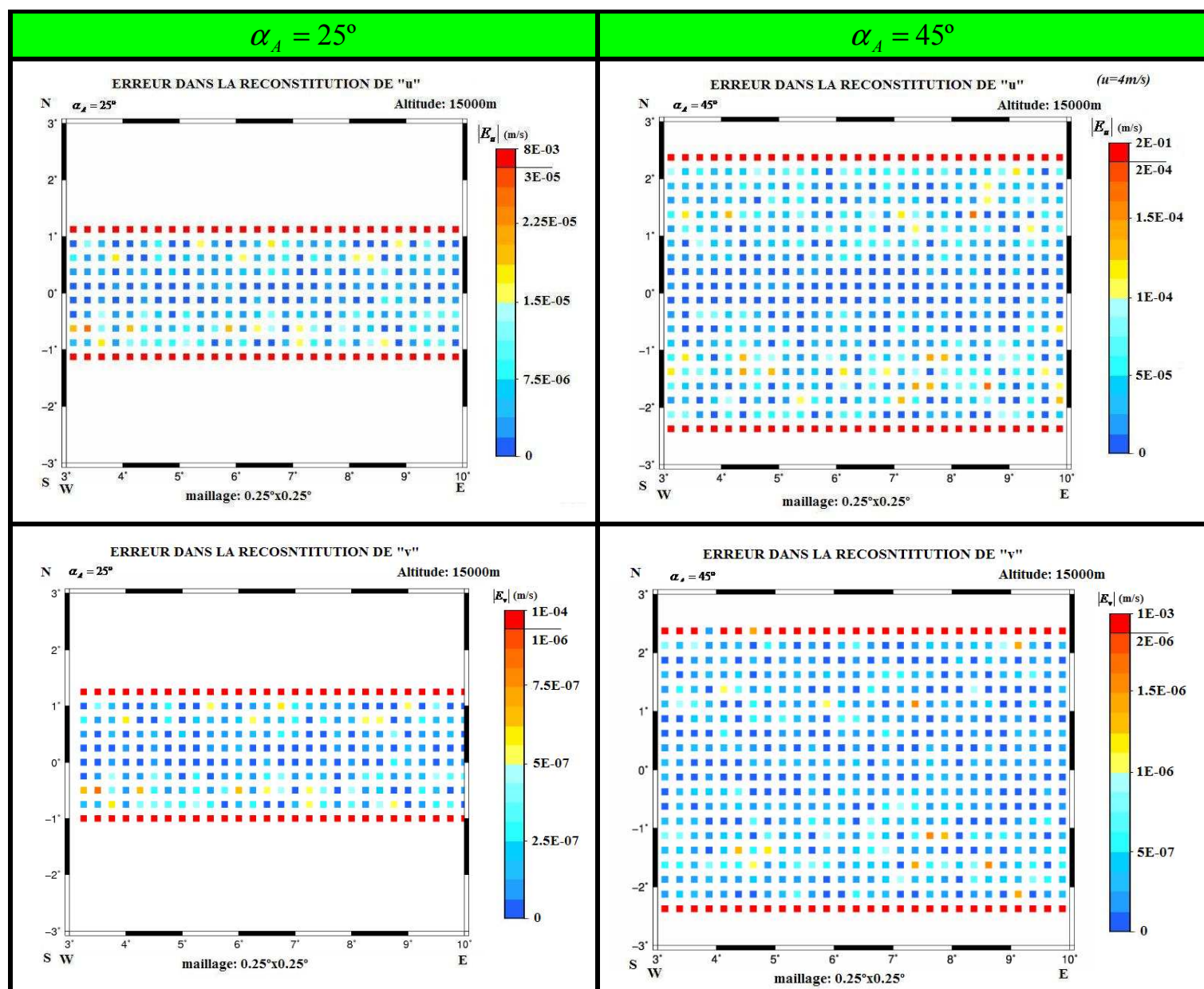


Figure 20 - Erreurs dans la reconstitution de la composante « u » et « v » pour $\alpha_A = 25^\circ$ et $\alpha_A = 45^\circ$

Dans un premier temps, en analysant les résultats obtenus pour les deux composantes, on remarque que les valeurs moyennes des erreurs commises sont relativement faibles pour les deux

angles d'ouverture imposés. On observe de même que, comme il était prévu, les erreurs de reconstitutions sont d'autant plus élevées que α_A est grand (facteur 10).

En comparant les ordres de grandeur des erreurs commis dans la reconstitution de « u » et « v », on constate que pour cette dernière on aboutit à des résultats plus fidèles au champ témoin.

Par ailleurs, on retrouve la même distribution en bandes symétriques que pour les densités de points de mesure mais dans ce cas l'explication est plus complexe. On distingue que les erreurs augmentent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la direction de déplacement du satellite. Cette magnitude atteint son maximum aux extrêmes Nord et Sud du domaine d'échantillonnage ce qui coïncide avec les zones de faible densité de points de mesure. Théoriquement, en ce qui concerne la composante « u », on pouvait s'attendre à obtenir de meilleurs résultats dans ces zones que dans la bande centrale à cause de la variation de contribution de cette composante sur la projection sur le vecteur faisceau. En effet si on se place sur la ligne imaginaire de latitude 0° , les empreintes qui se situent tout au long de cet axe sont issues d'une visée de l'antenne vers l'Est ou vers l'Ouest, d'où :

$$\left. \begin{array}{l} \theta_{geo} = 90^\circ \\ ou \\ \theta_{geo} = -270^\circ \end{array} \right\} \Leftrightarrow f_{NS} = Y_A \cdot \sin(\alpha_A) \cdot \cos(\theta_{geo}) = 0$$

Ceci implique que la contribution de la composante Nord-Sud (« u ») sur la Vitesse Doppler calculée sur cet axe, et donc sa contribution sur sa propre reconstitution, est nulle. Cependant le maillage du domaine d'échantillonnage permet que cette situation ne se produise pas grâce à l'existence de plusieurs mesures, sur chaque maille, provenant d'angles de balayage sensiblement différents. Il y a ainsi, dans cette zone, une contribution même petite de cette composante ce qui semble suffisant pour la reconstituer, selon les résultats obtenus dans la simulation. Ce même scénario avait été envisagé pour la composante Est-Ouest (« v ») dans les extrêmes Nord et Sud où l'on s'attendait à retrouver des erreurs supérieurs à ceux de la bande centrale.

Même si les résultats de la reconstitution de « v », présentés ci dessus, sont maintenant concordants avec cette hypothèse, on conclue que la variabilité des contributions des différentes composantes tout au long du domaine n'est pas une source d'erreurs capable de justifier les distributions des erreurs obtenues dans les simulations. Cependant il se peut que ça joue un rôle important sur le fait qu'on arrive à mieux reconstituer la composante « v » par rapport à « u » dans la bande centrale.

Il semble que l'explication la plus raisonnable est basée sur le concept de colinéarité. En effet les trois composantes du vecteur vitesse peuvent être reconstituées si dans la maille correspondante on est capable d'obtenir 3 mesures non-colinéaires, ce qui résulte forcément de 3 positions de l'antenne suffisamment éloignées les unes des autres. Or dans la bande centrale, on retrouve déjà deux mesures non-colinéaires résultant du double passage du faisceau radar dans chaque maille. Il est donc plus probable de retrouver une troisième mesure non-colinéaires dans cette zone que dans les extrêmes Nord et Sud où, de base, il n'y a qu'un seul passage du faisceau et en plus la densité de points de mesure est faible (cf. figure 19). On peut donc justifier, par le moyen de ce raisonnement, la distribution des erreurs obtenus dans la simulation pour les composantes « u » et « v » et on peut même l'illustrer à partir des

simulations réalisées pour $\alpha_A = 45^\circ$ et une précision de maille beaucoup plus faible que les précédentes ($3.5^\circ \times 3.5^\circ$) tout en utilisant la même échelle.

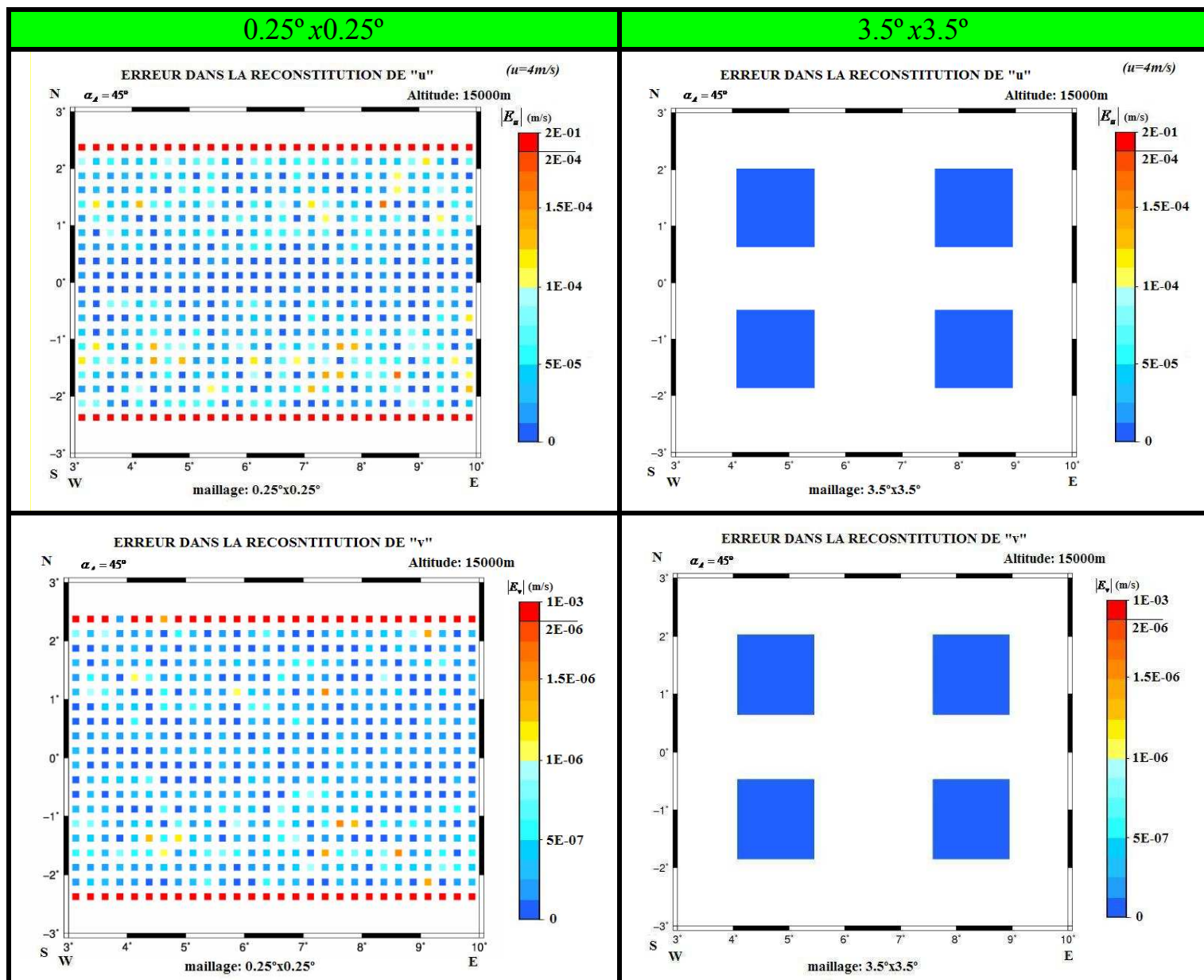


Figure 21 - Variation avec la précision du maillage des erreurs dans la reconstitution de "u" et "v"

À partir de l'analyse des images présentées ci-dessus, on peut confirmer l'hypothèse introduite précédemment. En effet, en diminuant la précision du maillage on est sûr d'obtenir 3 mesures Doppler non-colinéaires et ainsi reconstruire plus fidèlement le champ de vent 3D. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre la résolution du champ de vent reconstruit et les erreurs commises.

5.3.3. Erreur dans la reconstitution de « w »

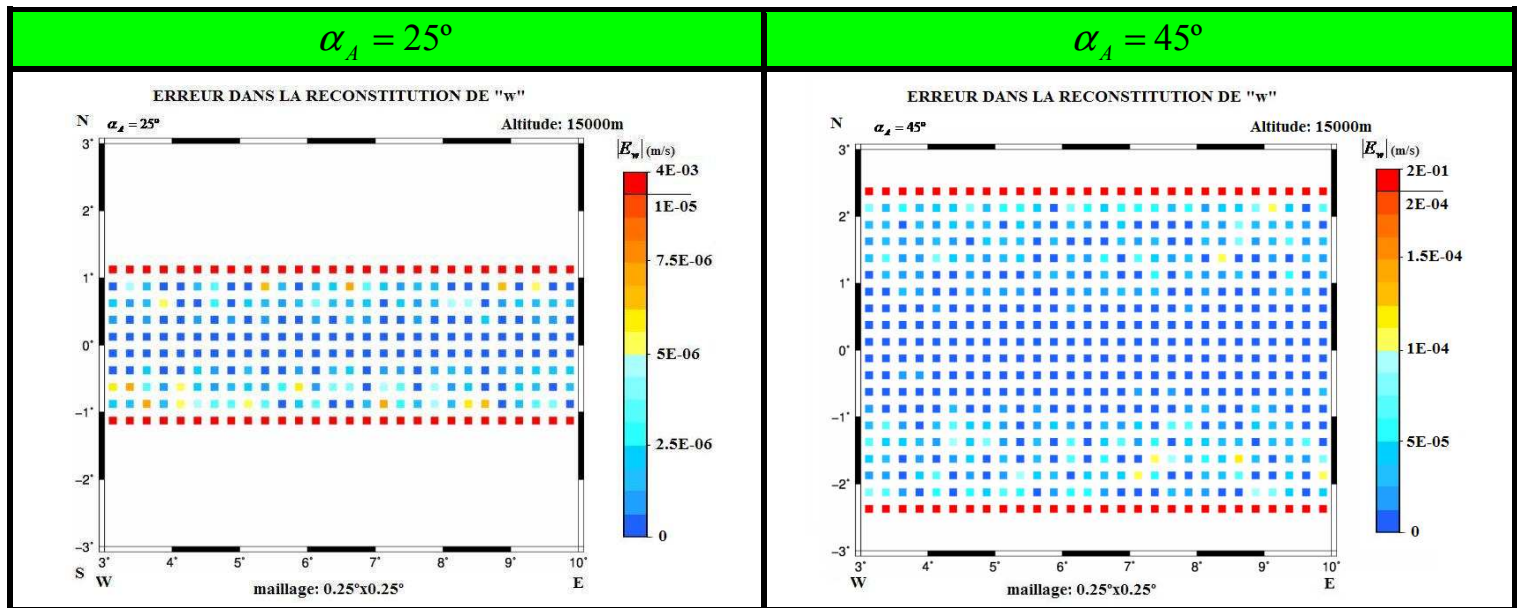


Figure 22 - Erreurs dans la reconstitution de la composante « w » pour $\alpha_A = 25^\circ$ et $\alpha_A = 45^\circ$

On observe encore la même distribution en bandes homogènes symétriques que l'on retrouvait pour les composantes « u » et « v » tout en obtenant de résultats très satisfaisants. En effet un des intérêts principaux d'installer un radar Doppler dans une plateforme spatiale est d'augmenter la précision dans la reconstitution des composantes verticales des champs de vitesses de n'importe quel hydrométéore (pluie, nuage ou glace).

L'interprétation de la distribution des erreurs dans le domaine d'échantillonnage suit le même raisonnement réalisé précédemment et peut également être illustrée par la simulation de faible résolution (cf. figure 23).

Par ailleurs on constate qu'en moyenne les erreurs commises dans la reconstitution de cette composante sont sensiblement supérieures par rapport aux deux autres. Il faudrait réaliser des analyses géométriques plus précises afin de déterminer une raison, sûrement basée sur la colinéarité des mesures, qui justifie cette différence qui existe entre les erreurs de « w » et celles de « u » et « v ».

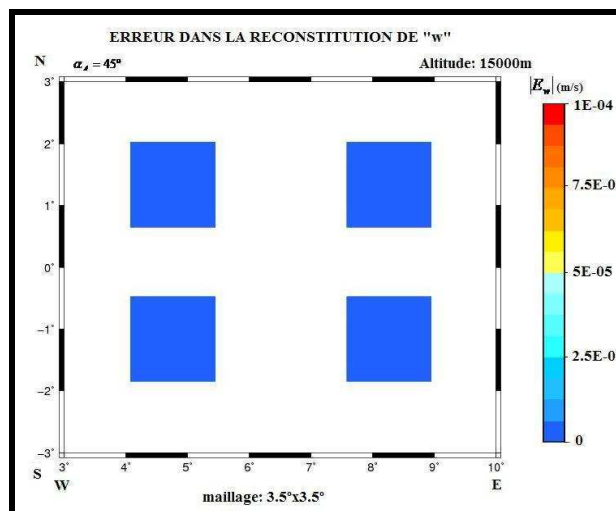


Figure 23- Erreurs dans la reconstitution de la composante « w » pour une résolution de maille de $3.5^\circ \times 3.5^\circ$

6. CONCLUSIONS

6.1. État d'avancement

Le but principal de ce projet étant le développement d'un simulateur de radar Doppler installé sur une plateforme spatiale, on a suivi 3 étapes principales :

- ❖ Établissement et modélisation de l'orbitographie du satellite
- ❖ Modélisation de l'échantillonnage du radar
- ❖ Modélisation du signal radar

Dans la première étape, on a cherché à définir la trajectoire de la plateforme en obtenant ses coordonnées tout au long de son déplacement autour de la Terre. Une fois que la position du satellite a été établie à chaque instant, on s'est servi de celle-ci comme référence pour obtenir l'expression analytique des coordonnées de l'empreinte au sol au fur et à mesure que l'antenne radar tourne. Malgré la complexité de la géométrie régissant l'échantillonnage, on a réussi à bien valider l'algorithme ce qui nous a servi pour mieux comprendre la forte interdépendance qu'il existe entre les différents paramètres décrivant le système. C'est en effet cette étude de sensibilité qui justifie l'intérêt de construire un simulateur qui nous permettra de trouver un compromis entre la précision des résultats et les contraintes imposées par la configuration du système.

En effet, une fois le simulateur mis en place, des simulations ont été réalisées dans le but de quantifier cette sensibilité en focalisant l'étude sur des paramètres comme la hauteur sombre, l'angle d'ouverture de l'antenne α et l'angle d'ouverture du faisceau β . Ce premier doit être considéré comme principal dans la conception d'un radar à bord d'un satellite puisque sa valeur va déterminer les limitations en altitude du domaine d'échantillonnage. À partir des résultats obtenus, on a bien vérifié que le seuil de mesures non valides va être d'autant plus important que l'angle d'ouverture sera grand. On a également vérifié que cette même relation existe entre la hauteur sombre et l'angle d'ouverture du faisceau β .

Comme application à ce simulateur, on a cherché à reconstituer un champ de vent 3D fixé aléatoirement. Pour cela on a suivi un protocole basé sur la méthode des moindres carrés pour un maillage défini. Les faibles erreurs obtenues, tout au long du domaine d'échantillonnage dans la reconstitution des 3 composantes du vecteur vitesse, nous permettent de valider cette méthode. On est arrivé à interpréter la distribution des erreurs dans le domaine grâce aux analyses de colinéarité entre les mesures provenant de différentes positions de l'antenne. Par ailleurs, on a vérifié que la diminution de l'angle d'ouverture de l'antenne provoque une augmentation de la densité des points de mesure et une diminution des erreurs de reconstitution des 3 composantes.

6.2. Bilan

Le bilan de ce projet est très positif aussi même dans le domaine scientifique que dans le personnel. Mon stage m'a servi pour affronter premièrement un sujet dont il a jamais été question tout au long de mes études d'ingénieur : satellites et radars. Le travail a eut une forte composante d'ingénierie dans les modélisations géométriques et du traitement de signal mais aussi on a suivi des démarches propres à la recherche scientifique où les résultats ne sont pas prévisibles initialement. Ce dernier aspect m'a beaucoup motivé tout au long de mon travail et m'a aidé à poursuivre la démarche jusqu'à la fin.

6.3. Travail à accomplir

Le premier aspect sur lequel on souhaiterait attirer l'attention des successeurs est l'introduction d'un générateur de bruit dans la modélisation des calculs de Vitesse Doppler. En effet la reconstitution du champ de vent 3D réalisé dans ce projet n'est pas sensible aux erreurs dans le calcul de ce paramètre. Dans la réalité, il existe un bruit regroupant entre autres les contributions de la vitesse du satellite et l'imprécision des appareils de mesure.

Les résultats obtenus dans la reconstitution du champ de vent sont considérablement faibles. Or, la question sur laquelle a reposé le développement de ce simulateur était si réellement on été capables d'obtenir les mêmes résultats que ceux auxquels on abouti actuellement grâce à des radars au sol ou aéroportés. Cette question n'a pas eut une réponse précise puisque l'on a pas arrivé à comparer les deux cas et on invite les successeurs à continuer dans cette voie tout en introduisant premièrement le générateur de bruit.

Il serait de même intéressant de continuer à analyser les sensibilités d'interdépendance entre les paramètres régissant le système d'étude et établir de nouveaux compromis à respecter dans la conception du radar et de la plateforme spatiale.

Finalement il reste aussi à expliquer la différence entre les erreurs obtenues pour la reconstitution de la composante verticale « w » du champ de vitesses et celles obtenues pour « u » et « v ».

BIBLIOGRAPHIE

Atlas, D., R. C. Srivastava and R.S. Sejhon, 1973: Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.*

Browning, K. A., and R. Wexler, 1968: The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*

Gal-Chen, T., 1978: A method for initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations. *Mon. Wea. Rev.*

Nutten, B., P. Amayenc, M. Chong, D. Hauser, F. Roux and J. Testud, 1979: The Ronsard radars: A versatile C-Band dual Doppler facility. *IEEE Trans. Geosci. Electron.* (special issue on Radar Meteorology)

Testud, J., and M. Chong, 1983: Three-dimensional wind field analysis from dual Doppler radar. Part I: Filtering, interpolating and differentiating the raw data. *J. Climate Appl. Meteor.*

Testud, J., G. Breger, P. Amayenc, M. Chong, B. Nutten and A. Sauvaget, 1980: A Doppler radar observation of a cold front. Three dimensional air circulation, related precipitation system and associated wave-like motions. *J. Atmos. Sci.*

Scialom, G., and Y. Lemaître, 1990: A new analysis for the retrieval of the three-dimensional wind field from multiple Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*

Rinehart, R., 1991: Radar for meteorologist

Viltard, N., and al. 2008: KARMA Project.

ANNEXE

```

program troubles

USE INVERSION_MOD

implicit none

!variables

INTEGER, PARAMETER :: int08b = selected_int_kind(2)      &
, int16b = selected_int_kind(4)      &
, real32b = selected_real_kind(r=30) &
, real64b = selected_real_kind(r=40)

!Rayon de la Terre
real R,Rt

!position du satellite
real zs,lats,lons
!vitesse tangentielle du satellite et inclinaison de l'orbite
real V_x,InclOrbit

!Composantes de la vitesse du satellite
real Vsat_u,Vsat_v,Vsat_w

!Foot print
real lat,lon,thetageo,thetageor

!Angles
!real theta !position de l'antenne par rapport au cercle qu'elle dÃ©crit
real beta !ouverture du faisceau Ã©mit par le radar

!vitesse de rotation de l'antenne
real theta_point,theta_pointd !d=degrÃ©es

!nb de points par tour d'antenne
integer n
INTEGER :: info

!temps
real temps,dt,tmax,ttc,tant

!PRF
real prf

!distance peridique entre deux points
real deltaxp,deltaxpkm

!Point A
real alpha_A,gamma_A,Y_A,F_A,lat_A

```

```

!Point B
real alpha_B,gamma_B,Y_B,F_B,lat_B

!Point C
real alpha_C,gamma_C,Y_C,F_C,lat_C

!Point D
real alpha_D,gamma_D,Y_D,F_D,lat_D

!real h

!Calcul "Axes ellipse"
!axe longitudinal
real deltalon_CD,deltalat_CD,a
!axe tangentiel
real deltalon_AB,deltalat_AB,b

!distance entre deux points consecutifs de la même boucle
real deltaxmb

!distance entre deux points consecutifs de boucles differents
real deltaxbd

!Vitesse du vent
real u !composante E-W
real v !composante N-S
real w !composante verticale

!Composante verticale de la vitesse de tombée des gouttes de pluie
real Vt

!Vitesse Doppler
real Vdoppler,Vdopplerc
real m !module du vecteur faisceau

!Integration
real bi,ti,ind
real thetainic,thetafin,thetaaux,thetamoy!,nmax

!zone sombre terre plate
real hsombre

!zone sombre terre ronde
real Y_prim,a_1,a_2,b_1,b_2,d_1,d_2,e,hsombrer,gammax

!vitesse lumiere
real vitlum

!porte
real lporte
real tporte

!distance spherique
real d

```

```
!variation de lon et lat
real deltalat,deltalon
```

```
!reconstruction du champ
```

```
REAL (kind = real64b),dimension(3,3) :: A_i !Matrice contenant les
coefficients du systeme d'equations AX=B
REAL (kind = real64b), dimension(3,3) :: Aaux !Matrice auxiliaire du meme
rang que B
REAL (kind = real64b), dimension(3) :: B_i !Matrice contenant les termes
independants du systeme d'equations AX=B
REAL (kind = real64b),dimension(3) :: Baux !Matrice auxiliaire du meme rang
que B
REAL (kind = real64b), dimension(3) :: X !Vecteur contenant les composantes
du champ de vent reconstruit u* v* w*
REAL (kind = real64b), dimension(1800) :: Vdopplercc !Vecteur des vitesses
doppler calculee a partir du champ de vent introduit initialement. Chaque
element du vecteur correspond a la vitesse radiale obtenue pour chaque
footprint de la maille choisie. La valeur est corrige en tenant en compte
la vitesse des gouttes de pluie. Le vecteur est rempli par ordre
chronologique.
REAL (kind = real64b), dimension(1800) :: Vdopplerr !Vecteur des vitesses
doppler reconstitue a partir du champ de vent obtenu par la methode des
moindres carres pour chaque maille. Les elements de ce vecteur correspondent
aux vitesses pour chaque footprint. Le vecteur est rempli par ordre
chronologique.
REAL (kind = real64b), dimension(1800) :: thetar !Vecteur contenant les
valeurs des thetageor correspondantes aux points qui appartiennent a la
maille d'analyse. Il est rempli par ordre chronologique.
REAL (kind = real64b), dimension(1800) :: erreurdop !erreur entre la vitesse
radiale calculee et la vitesse radiale reconstruite
```

```
real L_1,L_2,L_3 !Cosinus directeurs du faisceau du radar
real i,ix,j !compeurs
```

```
real erreuru,erreurv,erreurw !erreurs entre les composantes definies et les
composantes reconstruites du champ de vent
```

```
real latc,latca,longc,longca,p
```

```
real pi
```

```
pi = 4.*atan(1.)
```

```
!initialisation des variables
```

```
Rt = 6400000. !m
lats = 0. !deg
lons = 0. !deg
zs = 500000. !m
V_x = 7000. !m/s
theta_point = 90.*pi/180. !rad/s
alpha_A = 45.*pi/180. !rad
```

```
vitlum = 3.E8 !m/s
```

```

!n = 100.0
prf = 3000. !Hz
ttc = 2.*pi/theta_point !s
n = ttc*prf
dt = 2.*pi/(n*theta_point) !s
tmax = 250. !s
beta = 1.0*pi/180. !1 deg
tant = 0.

ind = 0.
i = 1.
ix = 1.

Vdopplercc = 0.
A_i = 0.
Aaux = 0.
B_i = 0.
Baux = 0.

!champ de vitesses du vent constant dans l'espace
u = 4. !m/s
v = 6. !m/s
w = 0. !m/s
Vt = 0. !m/s il est deja considere comme ayant une direction vers le bas
dans les equations

!Vitesse du satellite
InclOrbit = 0.
Vsat_u = V_x*COS(InclOrbit)
Vsat_v = V_x*SIN(InclOrbit)
Vsat_w = 0.

!module vecteur faisceau pour vdoppler

!m = sqrt(tan(alpha_A)*tan(alpha_A)+1.)

!integration
ti = 60./prf !60 par exemple

!porte
tporte = 1./(399.6*prf) !399.6 pour avoir 250m de longueur de porte
lporte = vitlum*tporte
!-----
!zone sombre terre plate
hsombre = (zs*(tan(alpha_A)-tan(alpha_A-
beta/2.))*sin(alpha_A)+vitlum*tporte/2.)*cos(alpha_A)
!zone sombre terre ronde
gammax = asin(((zs+Rt)*sin(alpha_A-beta/2.))/Rt)
Y_prim = -Rt*cos(gammax)+(zs+Rt)*cos(alpha_A-beta/2.)
a_1 = Y_prim*cos(beta/2.)
a_2 = a_1 - vitlum*tporte/2.
b_1 = a_2 * sin(alpha_A)
b_2 = a_2 * cos(alpha_A)
d_1 = zs - b_2
d_2 = Rt + d_1
e = sqrt(d_2*d_2 + b_1*b_1)
hsombrer = e - Rt
!-----
!ParamÃtres de sortie du programme
print*, "vitlum=", vitlum/1000., "km/s"

```

```

print*, "PRF=", prf, "Hz"
print*, "zs=", zs/1000., "km"
print*, "V_x=", V_x/1000., "km/s"
print*, "theta_point=", theta_point*180./pi, "tr/s"
print*, "alpha_A=", alpha_A*180./pi, "deg"
print*, "beta=", beta*180./pi, "deg"
print*, "ttc=", ttc, "s"
print*, "n=", n, "points"
print*, "hsombre=", hsombre/1000., "km"
print*, "hsombrer=", hsombrer/1000., "km"
print*, "ti=", ti, "s"
print*, "lporte=", lporte/1000., "km"

OPEN(UNIT=10, FILE='foot_print.dat', FORM='FORMATTED', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=12, FILE='Vdoppler.dat', FORM='FORMATTED', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=13, FILE='maillage.dat', FORM='FORMATTED', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=14, FILE='maille.dat', FORM='FORMATTED', STATUS='UNKNOWN')

!-----
!Boucles
!Do R = 6415000., 6420000., 250.
R = 6415000.
  latca = -2.5
!latca = -2.
  WRITE (10, '(a9,f7.0)') '>Altitude', (R-6000000.)
  Do latc = -2.25, 3., 0.25
  ! Do latc = 0.5, 3., 2.5
    longca = 3.
    Do longc = 3.25, 10., 0.25
    !Do longc = 6.5, 10., 3.5
      thetaaux = 0.
      lats = 0.
      lons = 0.
      ind = 0.
      A_i = 0.
      Aaux = 0.
      B_i = 0.
      Baux = 0.
      ix = 1.
      p = 0.
      tant = 0.
      thetar = 0.
      Vdopplercc = 0.

      Do temps = 0., tmax, ti
!-----
      !calcul de b

!gamma_A en rad
      gamma_A = asin(((zs+Rt)*sin(alpha_A))/R)
      Y_A = -R*cos(gamma_A)+(zs+Rt)*cos(alpha_A)
      F_A = Y_A*sin(alpha_A)
      lat_A = (pi/2.)-asin(F_A/R)
      !IF (latca== -2.75.AND.longca==2.25) then
!print*, "Y_A=", Y_A
!print*, "gammaA=", gamma_A
!endif
      alpha_B = acos((cos(beta/2.))*cos(alpha_A))
      gamma_B = asin(((zs+Rt)*sin(alpha_B))/R)

```

```

Y_B = -R*cos(gamma_B)+(zs+Rt)*cos(alpha_B)
F_B = Y_B*sin(alpha_B)
lat_B = (pi/2.)-asin(F_B/R)

deltalat_AB = lat_A - lat_B
deltalon_AB = asin((sin(beta/2.))/sin(alpha_B))

b =
2.*2.*R*asin(sqrt((sin(deltalat_AB/2.)*sin(deltalat_AB/2.))+cos(lat_A)*cos(l
at_B)*sin(deltalon_AB/2.)*sin(deltalon_AB/2.))) !!!!!b = 2*AB

!calcul de a

alpha_C = alpha_A - beta/2.
gamma_C = asin(((zs+Rt)*sin(alpha_C))/R)
Y_C = -R*cos(gamma_C)+(zs+Rt)*cos(alpha_C)
F_C = Y_C*sin(alpha_C)
lat_C = (pi/2.)-asin(F_C/R)

alpha_D = alpha_A + beta/2.
gamma_D = asin(((zs+Rt)*sin(alpha_D))/R)
Y_D = -R*cos(gamma_D)+(zs+Rt)*cos(alpha_D)
F_D = Y_D*sin(alpha_D)
lat_D = (pi/2.)-asin(F_D/R)

deltalat_CD = lat_C - lat_D
deltalon_CD = 0.

a =
2.*R*asin(sqrt((sin(deltalat_CD/2.)*sin(deltalat_CD/2.))+cos(lat_C)*cos(lat_
D)*sin(deltalon_CD/2.)*sin(deltalon_CD/2.)))

!-----

!latitude et longitude du sat en deg ou en rad ?????
lats = lats + Vsat_v*(temps-tant)/(Rt+zs)
lons = lons + Vsat_u*(temps-tant)/(Rt+zs)

!orientation de l'antenne
thetainic = thetaaux
thetafin = (floor(temps*prf))*(1./prf)*theta_point

if (ind==1.) then
    thetainic = 0.
end if

bi = (thetafin-thetainic)*(F_A/2.)+b

if (ind==0.) then
    bi=0.
end if

thetaaux = (ceiling(temps*prf))*(1./prf)*theta_point
thetamoy = (thetafin+thetainic)/2.

! d en m*rad
d = R * asin(F_A/(2.*R))

thetageo = thetamoy*180./pi-90.

```

```

thetageo=MOD(thetageo,360.)

thetageor = thetageo*pi/180.

deltalat = atan((F_A/2.)*cos(thetageor)/(zs+Rt-
Y_A*cos(alpha_A)))
deltalon = atan((F_A/2.)*cos(thetamoy)/(zs+Rt-Y_A*cos(alpha_A)))

lat = lats + deltalat
lon = lons + deltalon

!Module du vecteur faisceau
m =
sqrt((sin(alpha_A))*(cos(thetageor))*(sin(alpha_A))*(cos(thetageor))+(sin(al
pha_A))*(sin(thetageor))*(sin(alpha_A))*(sin(thetageor))+(cos(alpha_A))*(cos
(alpha_A)))

!Calcul de la vitesse doppler Ã partir du champ tÃmoin
Vdoppler =
(1./m)*(u*(sin(alpha_A))*(cos(thetageor))+v*(sin(alpha_A))*(sin(thetageor))-
(w-Vt)*(cos(alpha_A)))

ind = ind + 1.

!on divise par 2 xq il faut rentrer la mesure du demi axe et par 1000 xq
il faut rentrer cette mesure en km
! on retranche 6000000. i¸¸ R pour avoir l'altitude de la porte en km
if (R-6400000. < hsombrer) then

    Vdoppler = -9999.

endif

Vdopplerc = Vdoppler - (1./m)*(cos(alpha_A))*Vt
!Vdopplerc = Vdoppler + Vt

if( ((lat*180./pi) .LE. latc) .AND.((lat*180./pi) .GE. latca)
.AND. ((lon*180./pi) .LE. longc) .AND. ((lon*180./pi) .GE. longca)) then
    L_1 = (1./m)*(sin(alpha_A))*(cos(thetageor))
    L_2 = (1./m)*(sin(alpha_A))*(sin(thetageor))
    L_3 = -(1./m)*(cos(alpha_A))
    A_i(1,1) = L_1*L_1
    A_i(1,2) = L_1*L_2
    A_i(1,3) = L_1*L_3
    A_i(2,1) = L_1*L_2
    A_i(2,2) = L_2*L_2
    A_i(2,3) = L_2*L_3
    A_i(3,1) = L_1*L_3
    A_i(3,2) = L_2*L_3
    A_i(3,3) = L_3*L_3

    B_i(1) = L_1*Vdopplerc
    B_i(2) = L_2*Vdopplerc
    B_i(3) = L_3*Vdopplerc

    A_i = A_i + Aaux
    B_i = B_i + Baux
    Aaux = A_i
    Baux = B_i

```

```

        Vdopplercc(ix) = Vdopplerc
        thetar(ix) = thetageor
        ix = ix+1.
        p = p + 1.
        !write(13,'(f7.0,6f15.7)') (R-
6000000.), (lon*180./pi), (lat*180./pi), Vdoppler, thetageor, a/2000., bi/2000.
        endif

        IF (latca== -2.5.AND.longca==3.) then

            write(10,'(f7.0,6f15.7)') (R-
6400000.), lon*180./pi, lat*180./pi, Vdoppler, thetageo, a/2000., bi/2000.
            endif
            !write(12,'(6f15.7)') Vdoppler, thetageo, u, v, w, Vt

        tant = temps

    enddo !tiempo

if (p.NE.0.) then

    CALL INVERSION_GJ (3,A_i,B_i,X,info)

    Do j=1,30
        Vdopplerr(j) =
(1/m)*((sin(alpha_A))*cos(thetar(j))*X(1)+(sin(alpha_A))*(sin(thetar(j)))*X(
2)-(sin(alpha_A))*X(3))
        !Vdopplerr(j) =
tan(alpha_A)*sin(thetageor)*X(1)+tan(alpha_A)*cos(thetageor)*X(2)+X(3)
        if (Vdopplercc(j) == 0.) then
            Vdopplercc(j) = Vdopplerr(j)
        endif
    enddo !j

    erreurdop = abs(Vdopplercc - Vdopplerr)

    erreuru = abs(u - X(1))
    erreurv = abs(v - X(2))
    erreurw = abs(w - X(3))

    !write(14,'(f7.0,8f16.8)') (R-
6400000.), latca, latc, longca, longc, p, erreuru, erreurv, erreurw
    write(14,'(f7.0,8f16.8)') (R-
6400000.), (latca+latc)/2., (longca+longc)/2., p, erreuru, erreurv, erreurw
    else
    print*, "PAS DE POINTS ENTRE", latca, latc, "DE LATITUDE ET", longca, longc, "DE
LONGITUDE"
    endif
        longca = longc

    enddo !long

    latca = latc

    enddo !lat

!enddo ! R

close(10)

```



```
close (12)
close(13)
close(14)

OPEN(UNIT=11,FILE='dist.dat',FORM='FORMATTED',STATUS='UNKNOWN')

!theta_point en rad
do theta_point = 1.05,3.14,0.1

    deltaxp = V_x*2.*pi/theta_point

    !conversion en tr/min et km
    theta_pointd = theta_point*60./(2.*pi)
    deltaxpkm = deltaxp/1000.

    write(11,*) theta_pointd,deltaxpkm

enddo

close(11)

deltaxmb = (-V_x*pi/theta_point)+2.*zs*tan(alpha_A)
deltaxbd = (V_x*3.*pi/theta_point)-2.*zs*tan(alpha_A)

!distance entre points

!print*, "deltaxp=",deltaxp
!print*, "deltamb=",deltaxmb
!print*, "deltabd=",deltaxbd


end program troubles
```